

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Výstavba WDM-PON s využitím programového prostředí  
Optiwave**

**Realization WDM-PON using software Optiwave**

**2012**

**Bc. Jakub Jaroš**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Jaroš**  
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika  
Téma: **Výstavba WDM-PON s využitím programového prostředí Optiwave  
Realization WDM-PON using software Optiwave**

Zásady pro vypracování:

1. Popište stávající technologie PON.
2. Popište problematiku návrhu WDM-PON.
3. Navrhněte WDM-PON v programovém prostředí Optiwave s přihlédnutím na reálné možnosti laboratoře.
4. Navrženou WDM-PON realizujte v laboratoři a simulujte reálné podmínky provozu.
5. Porovnejte hodnoty z programového prostředí Optiwave s hodnotami změřenými na realizované WDM-PON.

Seznam doporučené odborné literatury:

LAUDE, Jean-Pierre. *DWDM Fundamentals, Components and Applications*. Norwood: ARTECH HOUSE, INC., 2002. 282 s. ISBN 1-58053-177-6.

KRAUSS, Ottmar. *DWDM and Optical Networks: An Introduction to terabit Technology*. Erlangen: Publicis KommunikationsAgentur, GWA, 2002. 196 s. ISBN 3-89578-174-6.

GUMASTE, Ashwin; ANTONY, Tony. *DWDM Network Design and Engineering Solutions: A comprehensive book on DWDM network design and implementation solutions*. Indianapolis: Cisco Press, 2003. 346 s. ISBN 1-58705-074-9.


LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 s. ISBN 978-0-12-373853-0.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 4.května.2012



.....

*Podpis*

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá popisem pasivních optických sítí. Hlavním zaměřením této práce je použití vlnově děleného multiplexu v pasivních optických sítích WDM-PON. První část práce obsahuje teoretický rozbor stávajících pasivních optických sítí, jejich možné řešení, popis jednotlivých standardů a jejich srovnání. Zvláštní pozornost je věnována WDM-PON sítím. Druhá část práce se již zabývá samotným návrhem testovací WDM-PON sítě v simulačním prostředí Optisystem od společnosti Optiwave. Jejím následným sestavením, v reálných podmínkách, na experimentálním pracovišti WDM-PON. Na závěr jsou jednotlivé naměřené hodnoty srovnány a vyhodnoceny.

## **Klíčová slova**

PON, FTTx, WDM-PON, AWG, Optiwave Optisystem

## **Abstract**

This thesis deals with description of Passive optical networks. The main focus is on the use of the wavelength division multiplexing in passive optical networks WDM-PON. First part consists of theoretical analysis of current passive optical network, their possible solutions, descriptions of individual standards and their comparison. The special attention is dedicated to WDM-PON networks. The second part of this thesis deals with suggestion of trial WDM-PON network in simulated program Optisystem from Optiwave Company. The thesis then contains its assemble in real conditions at experimental workplace WDM-PON. At the end, recorded values are compared and evaluated.

## **Key words**

PON, FTTx, WDM-PON, AWG, Optiwave Optisystem

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
10GE-PON	10 Gigabit Ethernet PON	10 Gigabit Ethernet PON
APD	Avalanche - Photodiode	Lavinová fotodioda
APON	ATM Passive Optical Network	ATM pasivní optická síť
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Asynchronní přenosový mód
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Uspořádaná vlnovodová mřížka
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
BPON	Broadband PON	Širokopásmová PON
CWDM	Coarse Wave Division Multiplex	Hrubý vlnový multiplex
DFB	Distributed FeedBack	Rozprostřená zpětná vazba
DWDM	Dense Wave Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Erbiem dopovaný opt. zesilovač
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Standard PON
FBT	Fused Biconical Taper	Výroba děličů tavením
FDM	Frequency Division Multiplex	Frekvenční multiplex
FTTA	Fiber To The Apartment	Vlákno do bytu
FTTB	Fiber To The Building	Vlákno do budovy
FTTC	Fiber To The Curb	Vlákno k chodníku
FTTCab	Fiber To The Cabinet	Vlákno do přístroje
FTTH	Fiber To The Home	Vlákno do domu
FTTN	Fiber To The Node	Vlákno do rozvaděče
FTTO	Fiber To The Office	Vlákno do kanceláře
FTTS	Fiber To The Serving Area	Vlákno do místa rozvodu
FTTU	Fiber To The User	Vlákno k uživateli

---

GEM	GPON Encapsulation Method	Přenosová metoda GEM
GPON	Gigabite Passive Optical Network	Gigabitová pasivní optická síť
IEEE	Institute of Electrical and Electronics	Institut pro elektrotechnické a
-	Engineers	elektronické inženýrství
ID	Identifier	Identifikátor
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunik. únie
LED	Light Emitting Diode	Světlo emitující dioda
NG-PON	Next Generation Passive Optical Network	PON další generace
OAN	Optical Access Network	Optická přístupová síť
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové zakončení
ONT	Optical Network Termination	Optické síťové zakončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
P2P	Point To Point	Bod-bod
PLC	Planar Lightwave Circuit	Planární optický obvod
PLI	Payload Length Indicator	Indikátor délky už. dat
PLOAM	Physical Layer Operation and Maintenance	Řídicí buňka
PN	P-N junction	Polovodičový přechod PN
PON	Passive Optical Network	Pasivní optická síť
PTI	Payload Type Indicator	Indikátor typu už. dat
TDM	Time Division Multiplex	Časový multiplex
TDMA	Time Division Multiplex Access	Časový multiplexový přístup
WDM	Wave Division Multiplex	Vlnový multiplex
xDSL	Digital Subscriber Line	Digitálně podepsaná linka
XG-PON	X Gigabit Passive Optical Network	Standard PON

---



# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Pasivní optické přístupové sítě .....	3
2.1	FTTx přípojky .....	3
2.2	Základní prvky PON .....	5
2.3	Topologie PON.....	6
2.3.1	Stromová topologie .....	6
2.3.2	Sběrníková topologie .....	7
2.3.3	Kruhová topologie .....	7
2.3.4	Hvězdicová topologie .....	8
2.4	Technologie sdílení přenosového média .....	9
2.4.1	TDM .....	10
2.4.2	FDM .....	11
2.4.3	WDM.....	12
3	Typy PON sítí.....	13
3.1	APON .....	13
3.2	BPON .....	14
3.3	GPON .....	15
3.4	EPON.....	16
3.5	10GEPON.....	16
3.6	XG-PON.....	17
4	WDM-PON .....	20
4.1	Varianty WDM-PON .....	21
4.1.1	Vlnový filtr umístěn v koncové ONT jednotce .....	21
4.1.2	Použití AWG filtru .....	22
4.1.3	Kaskádní zapojení .....	23
4.2	CWDM.....	23
4.3	DWDM.....	25

4.4	Prvky používané u WDM-PON.....	26
4.4.1	Multiplexery/Demultiplexery .....	26
4.4.2	AWG filtr.....	27
4.4.3	Pasivní optické děliče .....	28
4.5	Optické zdroje .....	29
4.5.1	Fabry-Perot lasery .....	30
4.5.2	DFB lasery.....	30
4.5.3	Laditelné lasery .....	30
4.6	Optické přijímače .....	31
4.6.1	Lavinové fotodiody APD.....	31
4.6.2	Fotodiody PIN .....	31
5	Návrh WDM-PON v programovém prostředí Optiwave .....	32
5.1	Vysílací část – OLT jednotka .....	34
5.1.1	WDM Transmitter .....	34
5.1.2	AWG filtr.....	35
5.1.3	Přijímací část .....	35
5.2	Přenosová část – ODN .....	36
5.2.1	Optické vlákno.....	36
5.2.2	AWG filtr.....	37
5.3	Koncová část – ONT jednotky .....	37
5.4	Měření pomocí optického spektrálního a WDM analyzátoru.....	38
5.5	Měření pomocí BER analyzátoru .....	41
5.5.1	BER .....	41
5.5.2	Q-faktor .....	41
5.5.3	Diagram oka .....	42
6	Měření na reálném pracovišti .....	43
6.1	WDM-PON zařízení.....	43
6.1.1	LG-Nortel EAST 1100 .....	43

6.1.2	LG-Nortel WPF 1132c .....	44
6.1.3	LG-Nortel EARU 1112 .....	45
6.2	Měřicí přístroje .....	45
6.3	Schéma a parametry měřené sítě .....	46
6.4	Měření optickým spektrálním analyzátozem .....	46
6.5	Měření BER.....	48
6.6	Porovnání simulovaných a naměřených výsledků.....	49
6.6.1	BER .....	49
6.6.2	Měření spektrálním analyzátozem .....	49
7	Závěr.....	52
	Použitá literatura .....	i
	Přílohy .....	iii
	Seznam příloh.....	v

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: FTTx přípojky</i> .....	4
<i>Obrázek 2: Pasivní optická síť</i> .....	5
<i>Obrázek 3: Stromová topologie</i> .....	6
<i>Obrázek 4: Sběrníková topologie</i> .....	7
<i>Obrázek 5: Kruhová topologie</i> .....	8
<i>Obrázek 6: Hvězdicová topologie</i> .....	8
<i>Obrázek 7: Základní rozdělení optických sítí</i> .....	9
<i>Obrázek 8: TDM sestupný směr</i> .....	10
<i>Obrázek 9: TDMA vzestupný směr</i> .....	11
<i>Obrázek 10: APON - rámec ATM buněk sestupný směr</i> .....	13
<i>Obrázek 11: APON - rámec ATM buněk vzestupný směr</i> .....	14
<i>Obrázek 12: BPON - rámec ATM buněk sestupný směr</i> .....	14
<i>Obrázek 13: BPON - rámec ATM buněk sestupný směr (asymetrický provoz)</i> .....	14
<i>Obrázek 14: GEM rámec</i> .....	15
<i>Obrázek 15: WDM-PON – vlnový filtr umístěný v ONT jednotce</i> .....	21
<i>Obrázek 16: WDM-PON – použití AWG filtru</i> .....	22
<i>Obrázek 17: WDM-PON – kaskádní zapojení</i> .....	23
<i>Obrázek 18: Princip Braggovy mřížky[14]</i> .....	26
<i>Obrázek 19: AWG filtr[22]</i> .....	27
<i>Obrázek 20: FBT dělič[19]</i> .....	29
<i>Obrázek 21: Spektra polovodičových zdrojů záření[15]</i> .....	29
<i>Obrázek 22: Schéma navržené WDM-PON sítě</i> .....	33
<i>Obrázek 23: Obrázek 24: WDM Transmitter</i> .....	34
<i>Obrázek 25: Přijímací část OLT</i> .....	35
<i>Obrázek 26: ONT jednotka</i> .....	37
<i>Obrázek 27: Schéma vytvořené ONT jednotky</i> .....	37
<i>Obrázek 28: Spektrum kanálů pro sestupný směr</i> .....	38
<i>Obrázek 29: Spektrum kanálů pro vzestupný směr</i> .....	39
<i>Obrázek 30: Spektrum kanálu za AWG filtrem</i> .....	39
<i>Obrázek 31: Diagram oka pro přenosovou rychlost 100 Mb/s</i> .....	42
<i>Obrázek 32: LG-Nortel EAST 1100[23]</i> .....	43
<i>Obrázek 33: LG-Nortel WPF 1132c[23]</i> .....	44
<i>Obrázek 34: LG-Nortel EARU 1112[23]</i> .....	45
<i>Obrázek 35: Schéma reálného zapojení</i> .....	46

<i>Obrázek 36: Spektrum kanálů pro sestupný směr .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 37: Spektrum kanálů pro vzestupný směr .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 38: Srovnání zobrazení spektrálním analyzátozem pro sestupný směr.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 39: Srovnání zobrazení spektrálním analyzátozem pro vzestupný směr.....</i>	<i>51</i>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Srovnání standardů PON.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 2: CWDM kanály podle ITU-T G.694.2.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 3: Útlumy děliče.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4: Kmitočty kanálů pro sestupný směr.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5: Parametry vlákna G.652.D.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 6: Kmitočty kanálů pro vzestupný směr.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7: Útlum kanálů v sestupném směru.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 8: Útlum kanálů v vzestupném směru.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 9: Hodnoty BER.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 10: Hodnoty Q-faktoru.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro sestupný směr ze spektrálního analyzátoru před AWG filtrem ...</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 12: Naměřené hodnoty pro vzestupný směr ze spektrálního analyzátoru za AWG filtrem .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 13: Hodnoty BER.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 14: Porovnání výkonů pro sestupný směr.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 15: Porovnání výkonů pro vzestupný směr.....</i>	<i>50</i>

---

# 1 Úvod

V dnešní době moderních informačních technologií neustále rostou nároky na přenosové trasy. Stávající přenosové kapacity, které dříve byly nemyslitelné, nám již přestávají pomalu stačit. Metalické vedení jsou již za hranic svých možností. Jejich použití je momentálně vhodné maximálně pro koncové části přístupových sítí. Na úrovni páteřních, transportních a metropolitních sítí jsou již optické sítě jediným možným řešením. Bohužel i původní technologie optických sítí, díky velkému rozšíření multimediálních služeb jako IPTV, již přestávají dostačovat. Velký rozmach zažívá hlavně streamování videa v HD kvalitě, které má obrovské nároky na přenosové trasy. Svůj podíl na tom má samozřejmě i stále se rozšiřující počet uživatelů využívající všechny tyto služby moderní doby.

Jelikož budování nových optických sítí je dosti nákladné, tak je snahou vyvíjet nové technologie, které by byly kompatibilní s těmi stávajícími. Především však možností jejich co nejjednoduššího rozšíření bez dalších investic. Velkým posunem vpřed je využití vlnově děleného multiplexu WDM. Tento způsob multiplexování nám umožňuje násobné navýšení přenosových kapacit. Proto se tento směr vývoje považuje za nejideálnější a s narůstajícími požadavky momentálně asi jediným vhodným řešením.

Tato práce se věnuje popisu pasivních optických sítí a především technologii vlnově děleného multiplexu WDM. Součástí je také návrh a praktická realizace těchto sítí. Práce je rozdělena do několika kapitol.

Druhá kapitola obsahuje popis pasivních optických přístupových sítí. Jsou zde uvedeny a zobrazeny možné způsoby zakončení, základní prvky a ukázky topologie pasivních optických přístupových sítí. Následně jsou zde popsány technologie sdíleného přenosového média.

Třetí kapitola je věnována standardům PON sítí. Jsou zde podrobněji popsány standardy APON, BPON, GPON, EPON, 10GEPON a XG-PON. Závěr kapitoly je věnován srovnání jejich parametrů.

Obsahem čtvrté kapitoly je podrobný popis technologie vlnového dělení multiplexu WDM-PON. Jsou zde ukázány možné varianty realizace WDM-PON sítí a popsány jejich přednosti a nedostatky. Další částí je dělení WDM-PON sítí podle odstupu vlnových délek na CWDM a DWDM. Konec kapitoly je věnován popisu jednotlivých částí WDM-PON sítě.

Pátá kapitola se zabývá již samostatnou praktickou částí práce. Konkrétně simulačním programem OptiSystem od společnosti Optiwave. Následně návrh testovací sítě, včetně popisu jednotlivých částí, s přihlédnutím na hardwarové možnosti experimentálního pracoviště WDM-PON na katedře telekomunikační techniky VŠB-TUO.

---

V šesté kapitole je již popsána samotná realizace a měření navržené testovací sítě přímo na experimentálním pracovišti. Součástí je seznam a popis použitých měřících přístrojů, zařízení a prvků v síti. Konec kapitoly je zaměřen na srovnání a zhodnocení obou metod realizace.



---

## 2 Pasivní optické přístupové sítě

Název pasivní optické přístupové sítě vychází z toho, že tyto sítě nevyužívají aktivní prvky v síti potřebující napájení elektrickou energií. To znamená, že všechny děliče a rozbočovače umístěné v dané síti pracují nezávisle na napájení. Tyto rozbočovače následně rozdělují a skládají optický signál v závislosti na směru komunikace. Celá síť samozřejmě nemůže být úplně pasivní a je potřeba napájet hlavní a koncová zařízení.

Pasivní optická přístupová síť se skládá z optického linkového zařízení (OLT), která nám přivádí zdrojový signál do sítě. Ten je veden společným vláknem až k pasivnímu optickému rozbočovači a dále do jednotlivých optických koncových zařízení (ONT). Díky rozbočovačům je možné tedy velice levně a jednoduše rozšiřovat celou síť.

Výhodou takto budovaných sítí jsou nižší náklady na provoz a údržbu. V těchto sítích klesá také riziko poruchovosti jednotlivých prvků.

Nevýhodou pasivních sítí je menší maximální dosažitelná vzdálenost v rozmezí 10-20 kilometrů v závislosti na technologii. Obzvláště při použití většího počtu rozbočovačů a koncových zařízení. Při návrhu se doporučuje používat co nejmenší počet pasivních optických děličů s co největším rozbočovacím poměrem. Je to z důvodu vysokého vložného útlumu, který má každý tento rozbočovač. Jelikož se u pasivních optických sítí nepoužívají žádné optické zesilovače a regenerátory, tak je jejich počet velmi limitující pro výslednou vzdálenost mezi koncovými jednotkami.

### 2.1 FTTx přípojky

FTTx (Fiber To The x) jsou širokopásmové architektury využívající optické vedení, které jsou podle druhu zakončeny v daném bodě (např. rozvodna, ústředna). Odtud na ně dále, přes účastnickou jednotku ONU, navazují metalické a koaxiální rozvody k jednotlivým účastníkům. V posledních dobách vzniklo velké množství označení FTTx sítí. Ty nejznámější budou popsány níže.

FTTH (Fiber To The Home) – vlákno je zavedeno až do domu nebo bytu zákazníka. Na trase k účastníkovi se nepodílí žádné metalické vedení. Je tedy vynechán nejslabší článek sítě a přenosová kapacita je proto u tohoto řešení nejlepší.

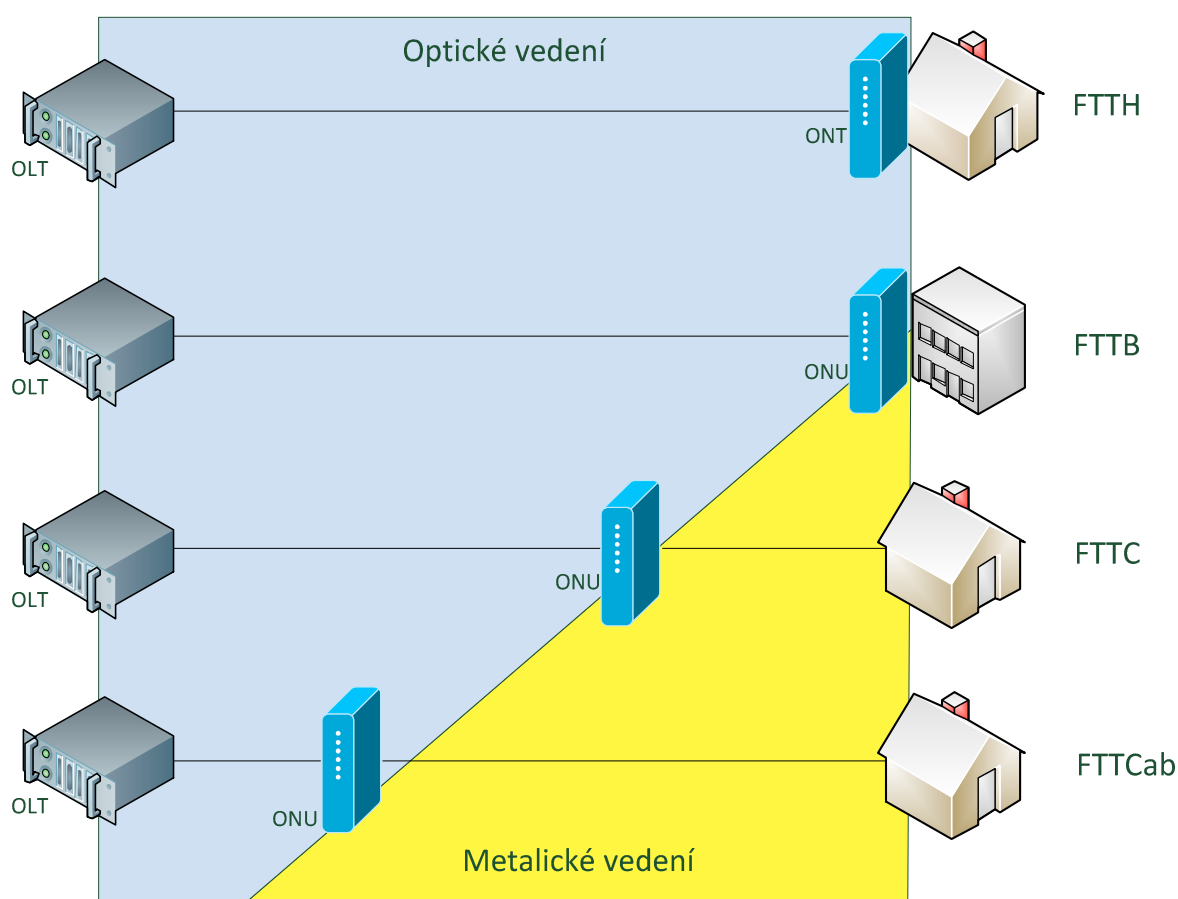
FTTB (Fiber To The Building) – vlákno je přivedeno až k budově. Většinou k rozvaděči v suterénu a odtud je dále rozvedena pomocí metalického vedení. Může být tedy využito i stávající vedení v těchto budovách. Nejčastěji se toto řešení využívá u bytových domů.

---

FTTO (Fiber To The Office) – vlákno je zavedeno až do kanceláře nebo důležitého uzlu (např. server). Zavádí se nejčastěji do firem, které vyžadují vysokou přenosovou kapacitu vedení.

FTTC (Fiber To The Curb) – vlákno je přivedeno do bodu, odkud je dále rozvedeno pomocí metalických nebo koaxiálních kabelů. Tato architektura se používá pro připojení menšího počtu zákazníků do 300 metrů od tohoto bodu. Je tedy ideální pro sídliště.

FTTCab (Fiber To The Cabinet) – podobné řešení jako u FTTC. Určeno pro větší počet účastníků do vzdálenosti až 1500 metrů od tohoto bodu. Využívá se například u městských obvodů. Toto řešení využívají telekomunikační a kabelové společnosti. Nejčastěji pak pro poskytování internetového připojení pomocí technologie xDSL.



*Obrázek 1: FTTx přípojky*

---

Další možné druhy FTTx:

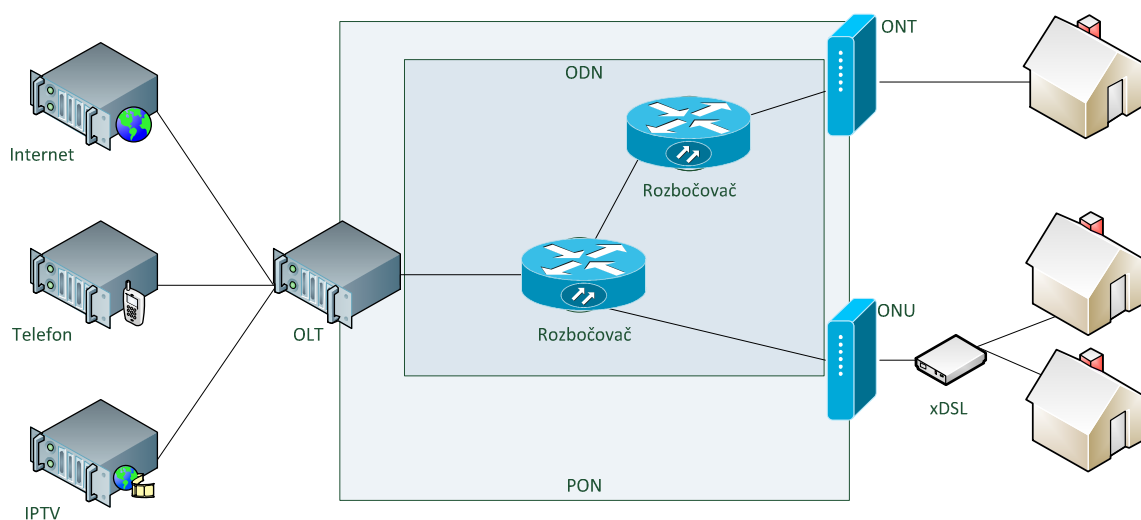
FTTU (Fiber To The User) – vlákno je zavedeno až k uživateli

FTTA (Fiber To The Apartment) – vlákno je zavedeno až do bytu

FTTS (Fiber To The Serving Area) – vlákno je zavedeno do místa rozvodu

FTTN (Fiber To The Node) – vlákno je zavedeno do distribučních uzlů

## 2.2 Základní prvky PON



Obrázek 2: Pasivní optická síť

OAN (Optical Access Network) – optická přístupová síť. Jsou to všechna optická zařízení, umístěna stromovitě, přenášející optickou informaci mezi jednotkou OLT a jednotkami ONT/ONU včetně.

ODN (Optical Distribution Network) – optická distribuční síť. Jedná se o základní prvek OAN. Je to soubor všech optických přenosových prostředků od jednotky OLT až po jednotky ONT/ONU. Jde zejména o všechny optické vlákna, pasivní optické rozbočovače, sváry, konektory a filtry.

OLT (Optical Line Termination) – optické linkové zakončení. Zajišťuje funkce rozhraní mezi přístupovou sítí a patřnými sítěmi telekomunikačních služeb. Slouží také pro řízení a správu ONT/ONU jednotek.

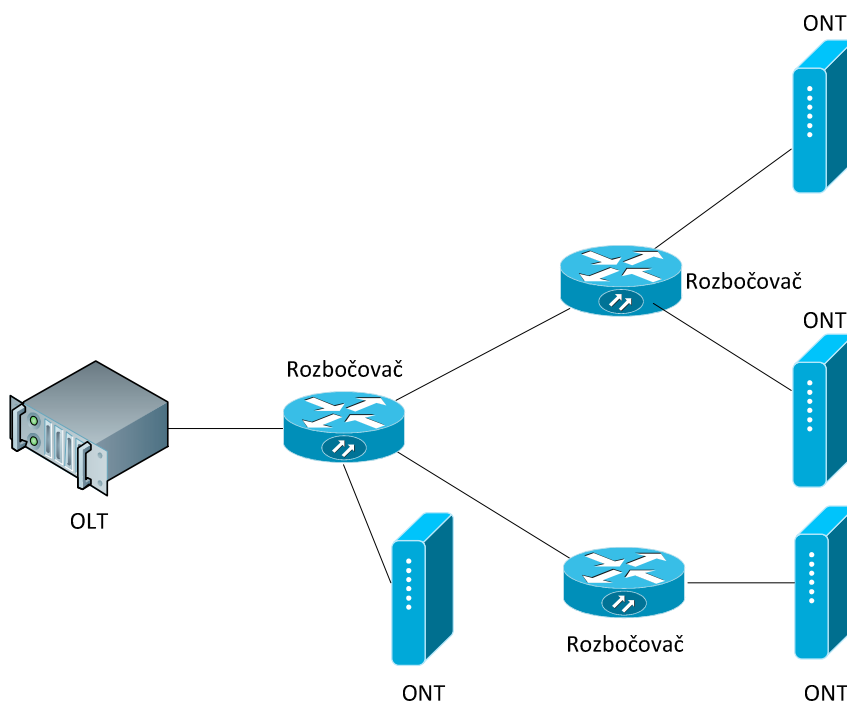
---

ONU (Optical Network Unit) – optická síťová jednotka. Zajišťuje funkce rozhraní mezi optickou a metalickou či bezdrátovou částí přístupové sítě. Na ně pak mohou navazovat další zařízení a technologie např. xDSL.

ONT (Optical Network Termination) – optické síťové zakončení. Jedná se o speciální typ ONU jednotky. Jednotka je nejčastěji umístěna v prostorách koncového zákazníka a zabezpečuje funkci účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí.

## 2.3 Topologie PON

### 2.3.1 Stromová topologie



*Obrázek 3: Stromová topologie*

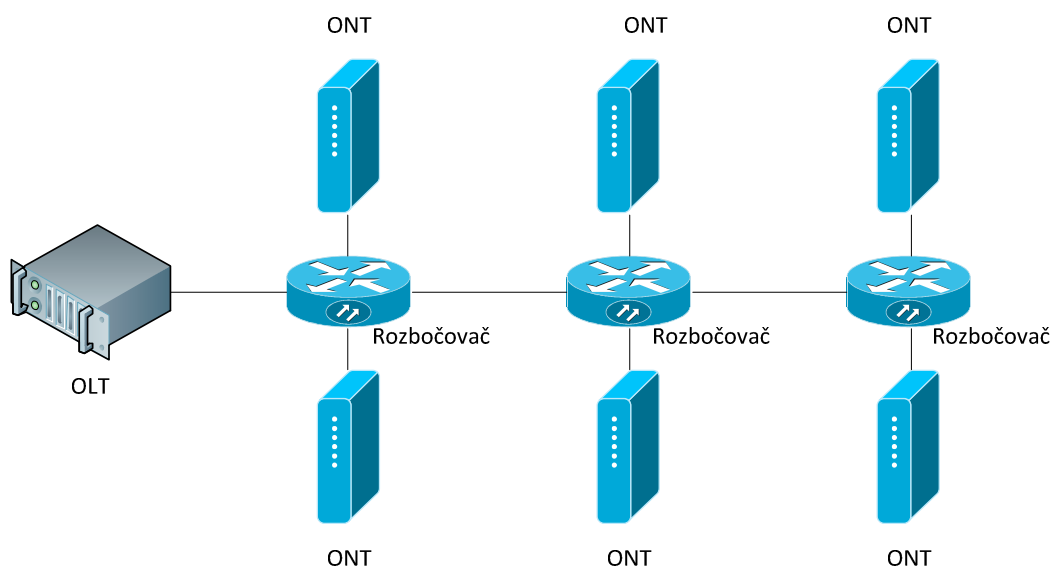
Stromová topologie je nejčastěji používaná topologie při výstavbě pasivních optických sítí. Stromová topologie označuje rozmístění optických jednotek do tvaru připomínající strom. Vychází z hvězdicové topologie. V této topologii je jako kořen stromu brána OLT jednotka. Optický signál z OLT jednotky se dále větví, pomocí pasivních optických rozbočovačů, do koncových ONT/ONU jednotek.

---

Výhodou je, že pokud selže jeden optický prvek, tak ostatní části PON mohou dále fungovat bez problému. Tato topologie nám ušetří i náklady díky menšímu množství optických vláken.

### 2.3.2 Sběrníková topologie

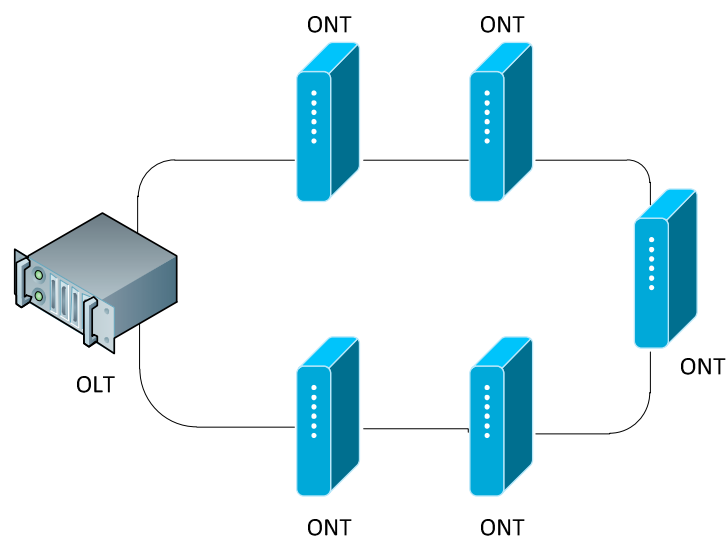
Tato topologie je někdy označována také jako univerzitní. Spojení zprostředkovává jediné přenosové médium (sběrnice), ke kterému jsou připojeny všechny uzly sítě. Její výhodou je velmi jednoduchá rozšiřitelnost a to přidáním dalšího rozbočovače. Tím se samozřejmě zase zvětšuje hodnota vloženého útlumu na trase.



Obrázek 4: Sběrníková topologie

### 2.3.3 Kruhová topologie

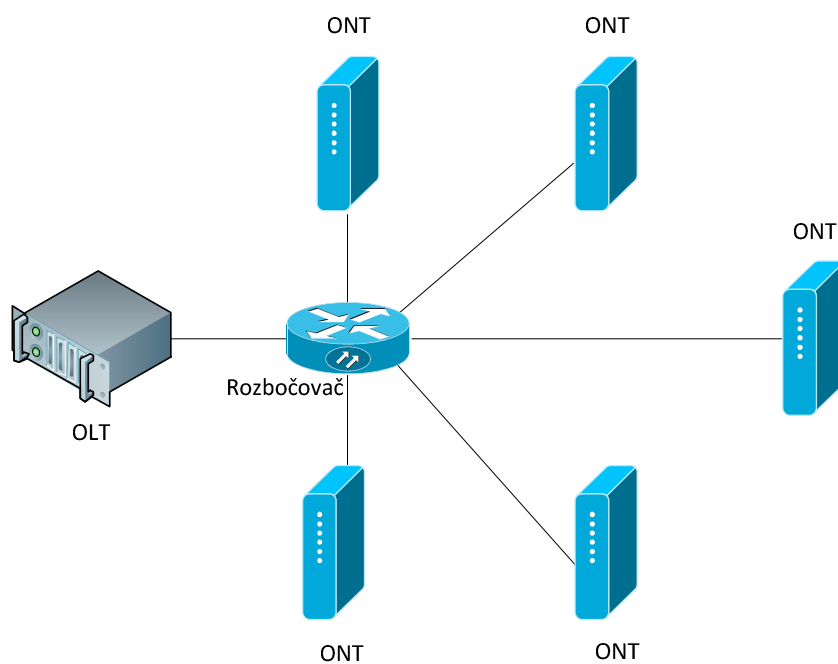
Tato topologie se hodí především pro metropolitní síť. Při použití vhodných koncových ONU jednotek může být provoz této sítě zálohován. Dojde-li pak k rozpojení v některé části vedení, tak lze dosáhnout OLT jednotky pomocí druhého směru trasy.



*Obrázek 5: Kruhová topologie*

#### 2.3.4 Hvězdicová topologie

Tato topologie je velmi podobná stromové topologii. Rozdíl je v tom, že je zde použit pouze jeden rozbočovač. Z tohoto rozbočovače pak vede do každého koncového zařízení jednotlivé vlákno. Toto řešení je vhodné spíše pro síť s koncovými jednotkami v menší vzdálenosti od rozbočovače.



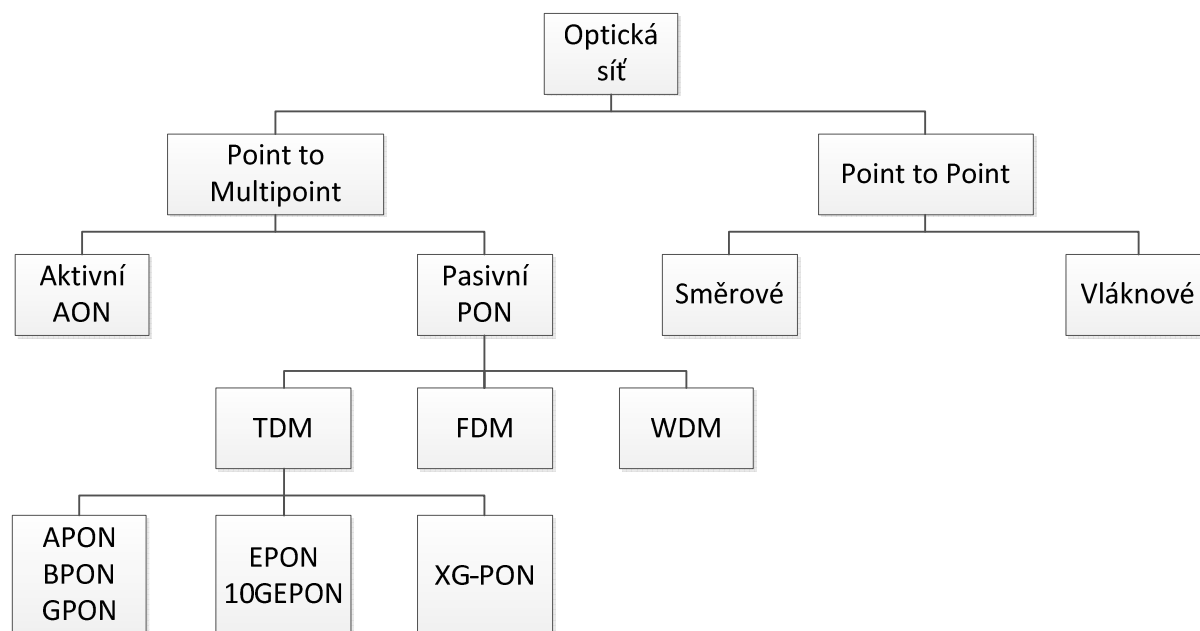
*Obrázek 6: Hvězdicová topologie*

---

## 2.4 Technologie sdílení přenosového média

Pasivní optické sítě jsou mnohabodového typu P2MP (Point To Multipoint). Tedy tyto sítě sdílejí jedno přenosové vlákno pro větší počet koncových uživatelů. Toto řešení nám významně zmenšuje počet tažených optických vláken.

Jelikož při vzestupném směru dochází k zpětnému skládání jednotlivých signálů, je potřeba zajistit, aby nedošlo ke kolizi jednotlivých dat. To lze zajistit použitím technologie multiplexování, která nám to umožňuje. Cílem je co možná nejlepší využití přenosové trasy. Mezi hlavní patří časový multiplex (TDM), frekvenční multiplex (FDM) a vlnový multiplex (WDM).



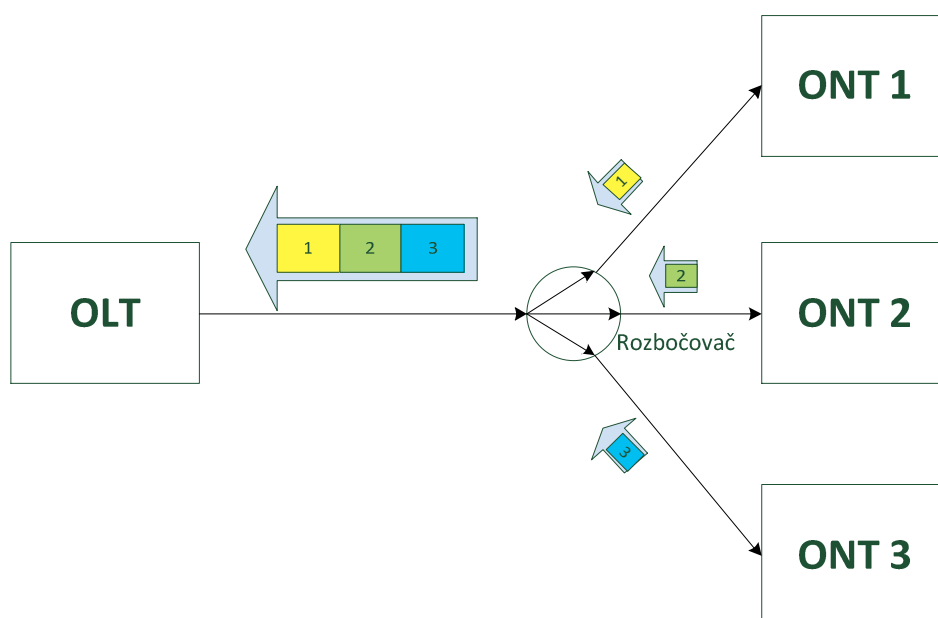
Obrázek 7: Základní rozdělení optických sítí

---

### 2.4.1 TDM

Časový multiplex TDM (Time Division Multiplex) je princip přenosu signálu jedním společným přenosovým médiem. To je zajištěno přidělením pevné časové délky, kdy mohou jednotlivé koncové jednotky přenášet informace.

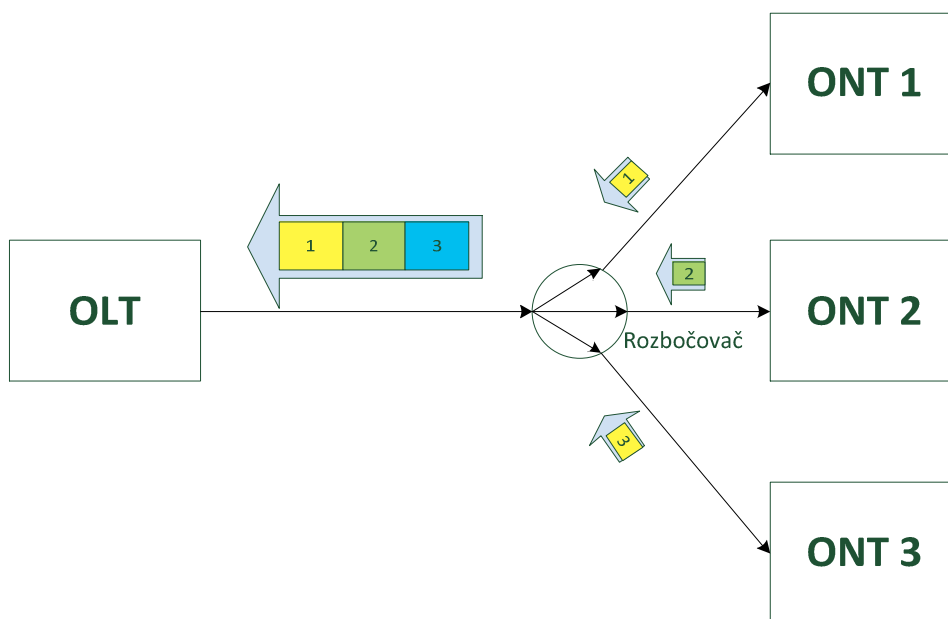
Pro sestupný směr je komunikace jednoduchá. OLT jednotka sdružuje všechny přicházející informace a posílá je ve společném časovém rámci po jednom přenosovém médiu dále do sítě. Ty jsou dále vysílány do všech ONT jednotek. To znamená, že každá ONT jednotka může mít kompletní přehled, o tom co je přenášeno v celé síti. Zvyšuje se tedy riziko nežádoucího odposlechu. Proto je nutné použít šifrování jednotlivých dat a zajistit tak jejich bezpečnost.



Obrázek 8: TDM sestupný směr

Pro vzestupný směr je již celý průběh komplikovanější a využívá se TDMA (Time Division Multiplex Access). Ten se stará o přesné vymezení časového rámce pro jednotlivé koncové ONT jednotky. Každá jednotka tedy vysílá v přiděleném čase jen určité množství dat, které se do tohoto rámce vejde. Celý tento proces má na starosti OLT jednotka, která takto vykonává správu celé komunikace.





Obrázek 9: TDMA vzestupný směr

Z obrázku je patrné jak se jednotlivé rámce z koncových ONT jednotek skládají. Budeme-li mít 3 koncové ONT jednotky, které nám vysílají signály 1|1|1, 2|2|2 a 3|3|3. Výsledný přenášený rámec bude vypadat takto 123123123. Při přenosu nám však může vznikat problém s rozlišením jednotlivých časových rámců a určením kdy začíná a kdy končí. Proto se používá ještě na začátek každého rámce předem definovaný obsah, který nám toto může rozlišit. Výsledný rámec může pak vypadat takto \$123\$123\$123. Toto řešení nám však mírně snižuje přenosovou kapacitu, protože musí přenášet větší objem dat navíc.

Další možný problém může být nestejná vzdálenost jednotlivých koncových ONT jednotek od OLT jednotky. Je tedy na OLT jednotce aby před zahájením komunikace, při hledání koncových ONT jednotek, zjistila doby zpoždění jednotlivých tras.

#### 2.4.2 FDM

Kmitočtové dělení FDM (Frequency Division Multiplex) funguje na principu oddělení obousměrného provozu na jednom přenosovém médiu pomocí rozdílných kmitočtů.

---

### 2.4.3 WDM

Technologie vlnového multiplexu WDM (Wave Division Multiplex) je založena na principu přenosu více signálů jedním optickým vláknem za použití více vlnových délek. Jedno optické vlákno může tedy přenést mnohem více informací nebo být použito pro obousměrný provoz. Technologie WDM bude podrobněji popsána v čtvrté kapitole.

---

## 3 Typy PON sítí

V průběhu let vzniklo několik standardů PON sítí, které byly více či méně úspěšné. Jednotlivé standardy zaštiťují organizace (ITU - International Telecommunication Union) nebo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Níže si jednotlivé standardy popíšeme.

### 3.1 APON

Standard APON (ATM Passive Optical Network) využívá k asynchronnímu přenosu ATM (Asynchronous Transfer Mode) protokol. APON byl specifikován Mezinárodní telekomunikační unií ITU roku 1998 jako standard ITU-T G.983. Jedná se o první standard pro pasivní optické sítě. APON je založena na časovém multiplexu TDM. Pro přenos veškerých informací v síti používá ATM buňky. Může pracovat ve dvou variantách rychlosti přenosu. Symetrický přenos nám umožňuje komunikovat přenosovou rychlostí 155,52 Mb/s v obou směrech. Asymetrický přenos nám umožňuje pro sestupný přenos komunikovat rychlostí 622,08 Mb/s a pro vzestupný 155,52 Mb/s. Komunikace probíhá po jednom vlákne pomocí různých vlnových délek. Pro sestupný směr je to 1480-1500nm a pro vzestupný 1260-1360nm. K OLT jednotce může být v případě APON připojeno až 32 koncových ONT jednotek.

1 PLOAM	1 ATM Buňka	2 ATM Buňka	....	27 ATM Buňka	2 PLOAM	28 ATM Buňka	....	53 ATM Buňka	54 ATM Buňka
------------	-------------------	-------------------	------	--------------------	------------	--------------------	------	--------------------	--------------------

*Obrázek 10: APON - rámec ATM buněk sestupný směr*

Pro sestupný směr jsou využívány ATM buňky o velikosti 53 bajtů. Tato buňka se skládá z 48 bajtů pro data a 5 bajtů pro hlavičku. Tyto buňky se seskupují do rámců o velikosti 56 buněk. Dvě z těchto buněk slouží pro služební účely a nazývají se PLOAM (Physical Layer Operation and Maintenance). Jejich účelem je zajištění správné komunikace mezi OLT a ONT jednotkami a přidělování přenosové kapacity.

---

3b záhlaví	1 ATM Buňka	3b záhlaví	2 ATM Buňka	....	3b záhlaví	53 ATM Buňka
---------------	-------------------	---------------	-------------------	------	---------------	--------------------

*Obrázek 11: APON - rámec ATM buněk vzestupný směr*

Pro vzestupný směr obsahuje rámec 53 buněk. Před každou buňkou je 3 bajtové záhlaví pro rozlišení jednotlivých koncových ONT jednotek. Rámec dále obsahuje služební interval, obsahující požadavky jednotlivých koncových ONT jednotek pro přidělení přenosové kapacity.

## 3.2 BPON

Standard BPON (Broadband Passive Optical Network) přímo vychází ze standardu APON. BPON byl specifikován Mezinárodní telekomunikační unií ITU roku 2001 jako standard ITU-T G.983.3. Jedná se o rozšíření standardu APON. Byla zde přidána vlnová délka 1550nm pro video přenos. Navýšení přenosové rychlosti bylo docíleno zvětšením počtu ATM buněk v jednom rámci. Přenosová rychlost zůstala pro asymetrický provoz stejná. Pro sestupný směr 622,08 Mb/s a pro vzestupný 155,52 Mb/s. Změna rychlosti, ale nastala u symetrického provozu, kdy pro sestupný i vzestupný směr dosahuje rychlosti 622,08 Mb/s.

1 PLOAM	1-27 ATM Buňka	2 PLOAM	28-54 ATM Buňka	3 PLOAM	55-81 ATM Buňka	....	190-216 ATM Buňka
------------	----------------------	------------	-----------------------	------------	-----------------------	------	-------------------------

*Obrázek 12: BPON - rámec ATM buněk sestupný směr*

Pro asymetrický provoz se navýšil počet v jednom rámci na 224 buněk. Pro služební účely se používá 8 PLOAM buněk. Ve vzestupném směru zůstal počet nezměněn na 53 buňkách.

3b záhlaví	1. ATM Buňka	3b záhlaví	2. ATM Buňka	....	3b záhlaví	208. ATM Buňka
---------------	-----------------	---------------	-----------------	------	---------------	----------------------

*Obrázek 13: BPON - rámec ATM buněk sestupný směr (asymetrický provoz)*

---

U symetrické varianty došlo k navýšení buněk pro sestupný i vzestupný směr. U sestupného směru je hodnota stejná jako v případě asymetrické varianty 224 buněk. Pro vzestupný směr se změnil počet na 208 buněk.

### 3.3 GPON

GPON (Gigabite Passive Optical Network) je evolucí standardu BPON. GPON byl specifikován Mezinárodní telekomunikační unií ITU roku 2003 jako standard ITU-T G.984. Tento standard pro přenos používá ATM buňky a protokol GEM (GPON Encapsulation Method), který vytváří rámce proměnné délky. Tím je zachována i zpětná kompatibilita starších standardů APON a BPON. Účelem tohoto standardu bylo hlavně navýšení přenosových rychlostí a zvětšení počtu koncových ONT jednotek na hodnotu 64. Později se objevily i sítě s možností použití 128 koncových ONT jednotek. Přenosová rychlost je v případě GPON 1244,16 Mb/s nebo 2488,32 Mb/s a to pro sestupný i vzestupný směr. Pracuje na vlnových délkách 1480-1500nm pro sestupný směr a 1260-1360nm pro vzestupný směr. Pro přenos videa se používá v sestupném směru ještě rozmezí vlnových délek 1550-1560nm.

ATM buňky a GEM rámce jsou rozdělovány do bloků o pevné délce 125μs. Díky tomuto se velmi přibližují k paketově orientovanému přenosu, podobně jako u IP protokolu v ethernet sítích. To, je pro většinu služeb mnohem výhodnější.

PLI 12b	PORT ID 12b	PTI 3b	HEC 13b	Payload max. 4095b
------------	----------------	-----------	------------	-----------------------

*Obrázek 14: GEM rámeček*

PLI (Payload Length Indicator) – obsahuje velikost uživatelských dat v bajtech

PORT ID (Port Identifier) - číslo portu, kam je rámeček odeslán nebo odkud je odeslán

PTI (Payload Type Indicator) - definuje zda jde o kompletní rámeček, popřípadě první nebo poslední rámeček

HEC (Header Error Detection and Correction) - zabezpečení přenášeného záhlaví

Payload – uživatelská data

---

### 3.4 EPON

EPON (Ethernet Passive Optical Network) je pasivní optická síť využívající pro přenos ethernetových rámců. Tento standart není již pod záštitou organizace ITU, ale pod záštitou organizace IEEE. EPON byl specifikován Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství IEEE roku 2004 jako standard IEEE 802.3ah. Tento standart využívá časového dělení multiplexů. Jeho velkou výhodou je především použití ethernetu na druhé vrstvě RM-OSI modelu. V době, kdy dochází k sjednocování sítí od transportních, až po domácí se jeví univerzálnost ethernetu jako nejlepší řešení.

EPON pracuje pouze v symetrickém provozu a to rychlostí 1,25 Gb/s v sestupném i vzestupném směru. Rychlost pro data je 1Gb/s a pro kódování a režii se využívá 0,25Gb/s. EPON využívá vlnových délek 1480-1500nm pro sestupný směr a 1260-1360nm pro vzestupný směr. U tohoto standardu lze připojit k jedné OLT jednotce pomocí rozbočovačů až 32 koncových ONT jednotek. Dosah sítě u tohoto standardu je 20 km.

Pro sestupný směr jsou ethernetové rámce posílány do všech koncových ONT jednotek. Pakety jsou vysílány z OLT jednotek a následně přijímány koncovými ONT jednotkami na základě MAC adres.

Pro vzestupný směr jsou jednotlivé ethernetové rámce dosažitelné jen pro OLT jednotku. Ostatní koncové ONT jednotky k nim nemají žádný přístup. Proto je zde nutné zajistit, aby nedošlo ke kolizi jednotlivých rámců. K zabezpečení bezchybného provozu je opět použit TDMA.

### 3.5 10GEAPON

10GEAPON (10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network) je následovníkem technologie EPON. Účelem tohoto standardu bylo navýšení přenosové rychlosti. 10GEAPON byl specifikován Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství IEEE roku 2009 jako standard IEEE 802.3av. Velkou výhodou tohoto standardu je zachování plné kompatibility s předchozí EPON. Cílem bylo zajistit co možná nejjednodušší přechod mezi těmito standardy. Změna technologie spočívá jen ve výměně koncových OLT a ONT jednotek podporujících nový standard. Je možné, aby standard 10GEAPON pracoval souběžně v režimu 10GEAPON a EPON. V případě EPON lze zachovat původní koncové ONT jednotky. 10GEAPON pracuje na stejných vlnových délkách jako EPON a to 1480-1500nm pro sestupný směr a 1260-1360nm pro vzestupný směr. Nově bylo přidáno rozmezí vlnových délek 1575-1580nm, které využívá vlnového multiplexu WDM. U tohoto standardu lze připojit k jedné OLT jednotce pomocí rozbočovačů až 32 koncových ONT jednotek. Dosah sítě u tohoto standardu je 20 km. 10GEAPON je možné provozovat jak v symetrickém, tak asymetrickém režimu.

---

V symetrickém režimu dosahuje 10GEPON rychlosti 10Gb/s v sestupném i vzestupném směru. U asymetrické varianty je rychlost sestupného směru 10Gb/s a vzestupného 1Gb/s. Asymetrická varianta vznikla především z důvodů úspory nákladů, protože zde není potřeba použití drahých optických zdrojů. Její nasazení má uplatnění především tam kde není potřeba velké přenosové rychlosti ve vzestupném směru. Hodí se tedy pro koncové účastníky využívající služeb IPTV a internetu.

### 3.6 XG-PON

XG-PON (X Gigabit Passive Optical Network) vzniklo za účelem navýšení přenosové rychlosti, která u GPON již přestávala vystačovat. XG-PON byl specifikován Mezinárodní telekomunikační unií ITU roku 2010 jako standard ITU-T G.987. Hlavním cílem tohoto standardu byla možnost zachování kompatibility s původní GPON. Následně také jednoduchý přechod mezi těmito standardy bez nutnosti velkých investic do stávající infrastruktury sítí. XG-PON pracuje na vlnových délkách 1575-1580nm pro sestupný směr a 1260-1280 nm vzestupný směr.

Pro sestupný směr bylo zvoleno pásmo 1575-1580 nm především s ohledem na standard GPON, který využívá rozmezí vlnových délek 1480-1500 nm pro sestupný směr. Navíc GPON využívá v sestupném směru rozmezí vlnových délek 1550-1560 nm pro distribuci videa.

Pro vzestupný směr se využívá rozmezí vlnových délek 1260-1280nm. Zde nám však vzniká kolize s původním standardem GPON, které pracovalo v rozmezí vlnových délek 1260-1360nm. Pro GPON tedy muselo být upraveno rozmezí vlnových délek na rozmezí 1290-1330nm, tak aby nedocházelo k zasahování do pásma pro XG-PON. Došlo tedy k úpravě GPON standardu ITU-T G.984 vydáním doplňku ITU-T G.984.5, ve kterém je specifikováno použití dodatečné vlnové výhybky označované jako WDM1r obsahující vlnové filtry. To však přineslo do trasy dodatečný vložný útlum. Tyto výhybky musely být aplikovány i do koncových ONT jednotek.

S příchodem XG-PON byla vypracována koncepce navazujících pasivních optických sítí, které se rozdělovaly do dvou směrů – NG-PON1 a NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network). První směr NG-PON1, kde můžeme zahrnout i stávající XG-PON, se zabývá hlavně zpětnou kompatibilitou s předchozími standardy. Je založen na časově děleném multiplexu TDMA a prozatím počítá s využitím vlnového dělení multiplexu WDM jen velmi omezeně. Druhý směr NG-PON2 již počítá s plnou integrací vlnově děleného multiplexu WDM a vytvořením hybridních pasivních optických sítí WDM-TDM. To nám umožní několikanásobně zvětšit přenosové kapacity

---

pasivních optických sítí. Nevýhodou je nekompatibilita s předchozími standardy a nutnost změny celé koncepce.

XGPON pracuje pouze v asymetrickém režimu a dosahuje přenosových rychlostí 9,95328 Gb/s pro sestupný směr a 2,48832 Gb/s pro vzestupný směr. U vzestupného směru tedy zůstala přenosová rychlost totožná jako u GPON. V případě XG-PON lze k OLT jednotce pomocí rozbočovačů připojit až 256 koncových ONT jednotek. Z toho vyplývá, že počet jednotek oproti GPON nám vzrostl čtyřnásobně. Dosah této sítě je udáván v délce 20km, ale spekuluje se o jeho navýšení až na hodnotu 40km.

U tohoto standardu je také lépe zabezpečen provoz ve vzestupném směru. Původní zabezpečení rámců u GPON mělo být bezchybné. Teprve až praktické nasazování těchto sítí odhalilo jisté nedostatky a možnosti odposlouchávání. Lepší bezpečnosti u XG-PON bylo dosaženo bezpečnou výměnou šifrovacích klíčů a pokročilou metodou vzájemné identifikace koncových OLT a ONT jednotek.



		APON	BPON	EPON	GPON	10GE-PON	XG-PON
Standart		ITU-T G.983.1 (1998)	ITU-T G.983.3 (2001)	IEEE 802.3ah (2003)	ITU-T G.984.1 (2004)	IEEE 802.3av (2009)	ITU-T G.987 (2010)
Rychlost [Mb/s]	Sestupný s.	622,08	1244,16	2488,32	1250	10312	9953
	Vzestupný s.	155,52	622,08	2488,32	1250	10312	9953
Protokol		ATM	ATM	ATM/GEM	Ethernet	Ethernet	MIB
Rozbočovací poměr		1:32	1:32	1:128	1:32	1:32	1:256
Vzdálenost [km]		20	20	20	20	20	20
Šifrování		AES	AES	AES	volitelné	volitelné	AES
Vlnová délka [nm]	Sestupný s.	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580
	Vzestupný s.	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1280	1260-1280
Optický zdroj		FP/DFB	FP/DFB	FP/DFB	DFB	DFB	DFB

*Tabulka 1: Srovnání standardů PON*

---

## 4 WDM-PON

WDM-PON (Wave Division Multiplex Passive Optical Network) jsou pasivní optické sítě založené na principu přenosu více signálů jedním optickým vláknem, za použití více vlnových délek. To nám umožňuje několikanásobně navýšit kapacitu původních přenosových optických tras. Její výhodou je možnost nasazení i na stávající optické sítě. Samozřejmě za předpokladu výměny jednotlivých zařízení, ale bez nutnosti pokládání nových optických vláken. Tento standart vznikl především z důvodu blížícího se nedostatku přenosových kapacit, protože nároky uživatelů s příchodem nových technologií stále rostou. WDM-PON byl specifikován Mezinárodní telekomunikační unií ITU roku 2003 jako standard ITU-T G.694.2. Tento standart nám určuje dvě varianty dělení daného odstupem vlnových délek - hrubé CWDM (Coarse Wave Division Multiplex) a husté DWDM (Dense Wave Division Multiplex).

Výhodou u WDM-PON je nezávislost jednotlivých kanálů. Tímto je komunikace ve WDM-PON sítích velice podobná P2P (Point To Point) spojením, ale s použitím jen jediného vlákna. Každý účastník využívá dva kanály. Jeden určený pro sestupný směr a druhý pro vzestupný. Jednotlivé koncové ONT jednotky nejsou nijak závislé na ostatních koncových ONT jednotkách. Všechny přenosy informací je oddělen a ostatní koncové ONT jednotky k němu nemají žádný přístup. To nám zvyšuje míru zabezpečení a možnost použití i pro uživatele vyžadující velkou bezpečnost přenosu svých dat. Jednotliví uživatelé nesdílejí ani přenosovou kapacitu a jsou nezávislí na vytížení linky ostatními uživateli. Na každém kanálu nám může klidně běžet úplně odlišná služba.

U WDM můžeme dosáhnout přenosové rychlosti až 10 Gb/s pro každý kanál. Teoreticky tak při použití této technologie můžeme připojit až 1000 uživatelů do vzdálenosti 100km s velikostí garantované přenosové rychlosti 1Gb/s.

Nasazování WDM-PON je momentálně cenově velmi náročné. Jednotlivé zařízení kvůli nutnosti velké přesnosti jednotlivých součástek jsou hodně drahé. Nasazování starších technologií vychází prozatím cenově přijatelněji. Předpokládá se však velký rozvoj této technologie a pokles její ceny.

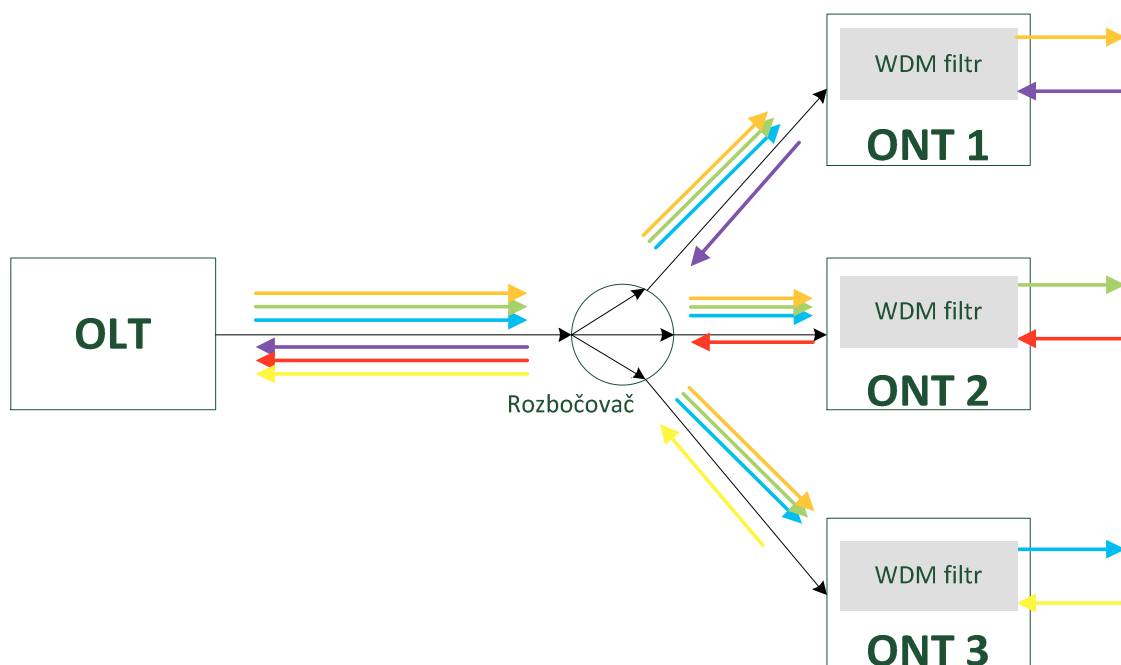
---

## 4.1 Varianty WDM-PON

Existuje několik variant jak navrhnout WDM-PON. Některé jsou více či méně výhodné pro nasazení do stávajících sítí. Rozdíl je také v zabezpečení, protože některé varianty přejímají nevýhody stávajících pasivních optických sítí a existuje zde riziko odposlechu.

### 4.1.1 Vlnový filtr umístěn v koncové ONT jednotce

U této varianty můžeme využít stávající pasivní optickou síť a stačí nám jen výměna OLT a ONT jednotky. Každá koncová jednotka má svojí pevně přidělenou vlnovou délku, na které vysílá ve vzestupném směru. Komunikace v sestupném směru probíhá stejně jako u dřívějších pasivních optických sítí. To znamená, že signál z OLT jednotky je vysílán, přes pasivní optický rozbočovač, do všech koncových ONT jednotek. Teprve zde se pomocí pevně nastaveného WDM filtru oddělí daná vlnová délka určená pro tuto koncovou ONT jednotku. Je zde tedy zapotřebí zajistit šifrování dat tak, aby nemohlo dojít k nežádanému odposlechu. Mezi výhody patří určitě cena tohoto řešení, kdy se využívá cenově dostupných pasivních optických filtrů.



Obrázek 15: WDM-PON – vlnový filtr umístěný v ONT jednotce

---

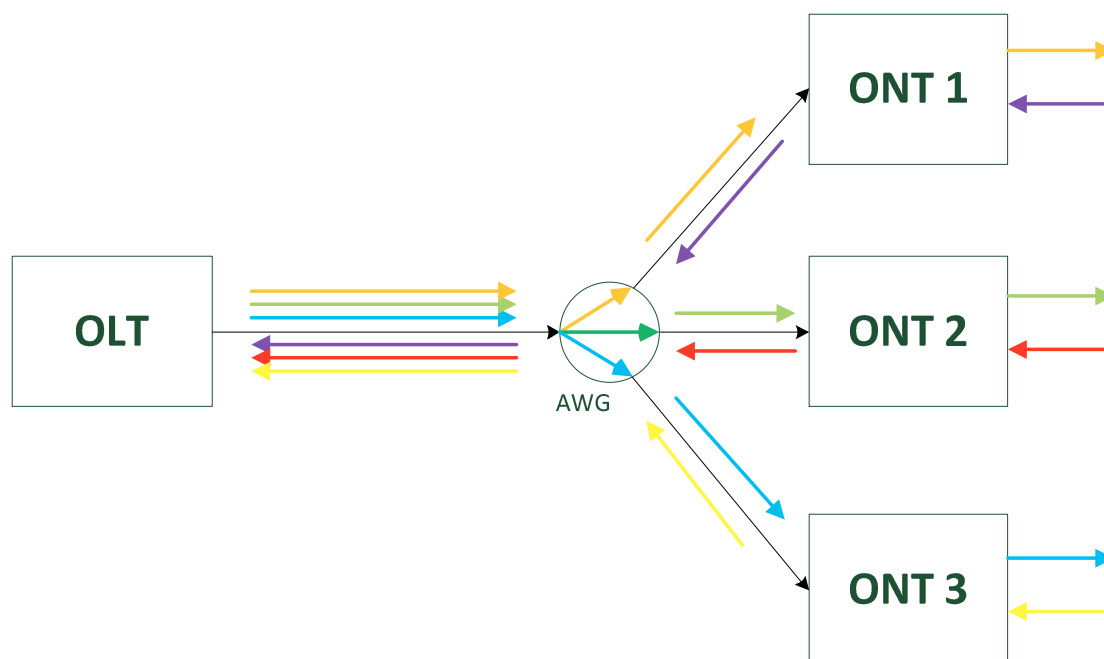
#### 4.1.2 Použití AWG filtru

V této variantě je nahrazen pasivní optický rozbočovač AWG filtrem, který filtruje provoz pro jednotlivé koncové ONT jednotky. Použitím AWG filtru se nám výrazně snižuje vložný útlum oproti klasickému pasivnímu optickému filtru. Tím se nám zvětšuje dosah pasivní optické sítě. AWG filtr má útlum zpravidla okolo 4-5 dB a je nezávislý na počtu koncových ONT jednotek. V porovnání s klasickým pasivním optickým filtrem pro 64 účastníků, kdy útlum dosahuje hodnoty 20dB, jde o výrazný rozdíl. Další výhodou je, že není potřeba použití pasivního optického filtru v koncových ONT jednotkách a dojde tak k dalšímu snížení celkového útlumu.

Pro sestupný směr je signál z OLT jednotky vysílán ve vlnovém multiplexu. Tento signál se dále filtruje na oddělené vlnové délky pomocí AWG filtru pro jednotlivé koncové ONT jednotky. Z toho vyplývá, že každá koncová ONT jednotka obdrží jen svůj signál na dané vlnové délce.

Ve vzestupném směru probíhá komunikace obdobně jako u první předchozí varianty a vyslaný signál se opět skládá v AWG filtru do jednoho vlnového multiplexu.

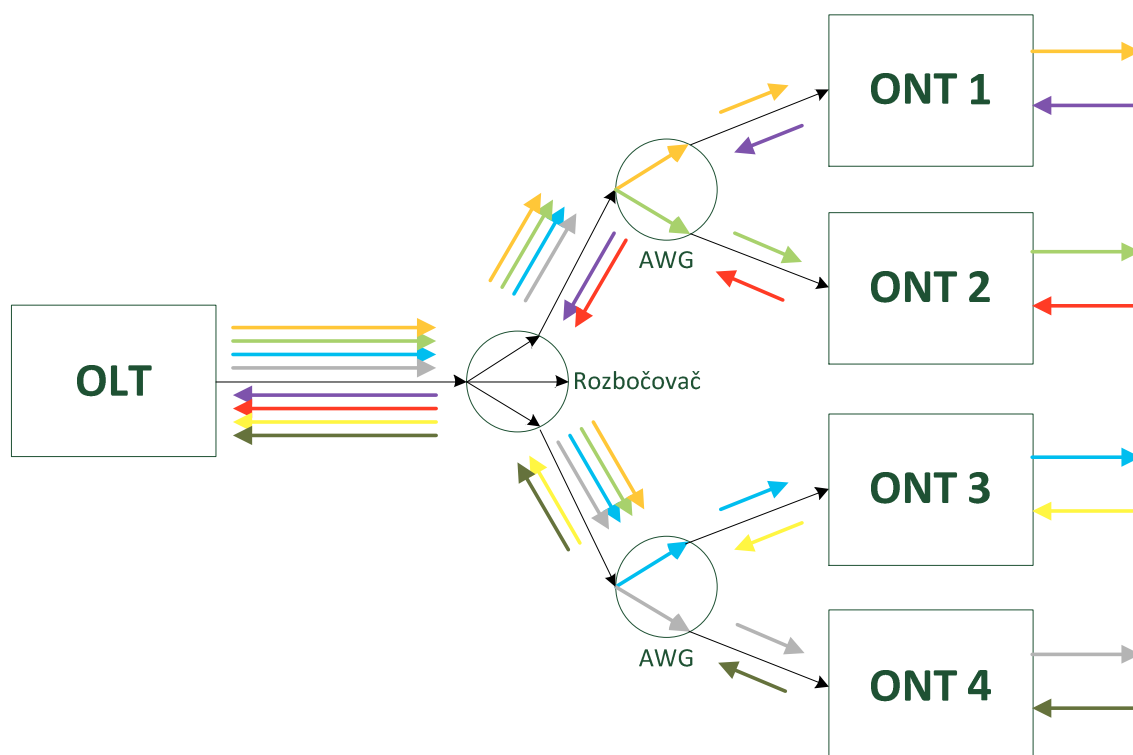
Toto řešení nám přináší hlavní výhody WDM-PON sítí a to v podobě bezpečnosti. Jak už zbylo zmíněno, tak každá koncová ONT jednotka obdrží jen signál o své vlnové délce. Z toho vyplývá, že nemůže dojít k nežádoucímu odposlechu.



Obrázek 16: WDM-PON – použití AWG filtru

### 4.1.3 Kaskádní zapojení

U této varianty se využívá kombinace pasivních optických rozbočovačů a AWG filtrů, které se řadí kaskádně. Lze také použít několik AWG filtrů. Obzvláště použití více AWG filtrů může být vhodné u hustého DWDM vlnového multiplexu. Můžeme tak docílit mnohem větší přesnosti při filtrování jednotlivých vlnových délek. Nevýhodou je samozřejmě větší útlum, který roste s počtem pasivních optických rozbočovačů a AWG filtrů.



Obrázek 17: WDM-PON – kaskádní zapojení

## 4.2 CWDM

Hrubé CWDM vlnové dělení vzniklo jako levnější varianta DWDM. Odstup mezi jednotlivými kanály je výrazně větší než u DWDM. Odstup jednotlivých vlnových délek je 20nm. Při takto velké rozteči vlnových délek můžeme počítat s tolerancí  $\pm 6,5\text{nm}$  na každý kanál. Díky této toleranci nám tedy nevznikají nároky na kvalitu laserů, optických vláken, multiplexorů a demultiplexorů. Je možné použití laserových diod bez nároků na chlazení. CWDM bývá také označována jako teplotně nezávislá varianta.

CWDM využívá rozmezí vlnových délek 1270-1610nm. Můžeme tedy využít až 18 nosných kanálů celkem ve všech 5 pásmech. Jednotlivé vlnové délky a jejich rozdělní do pásem nám určuje standard ITU-T G.694.2. Přehled všech kanálů můžete vidět v tabulce č.2.

CWDM vlnové dělení se nejčastěji používá v metropolitních sítích, kde také bývá kombinováno s DWDM. Jeho hlavní výhodou jsou mnohem nižší pořizovací náklady oproti DWDM a to je v dnešní době jeden z hlavních argumentů. Mezi nevýhody patří určitě velmi malý počet využitelných kanálů, který je v porovnání s DWDM několikanásobně menší.

Pásmo	Kanál ITU-T G.694.2	Vlnová délka [nm]
O - Original (1260-1360 nm)	27	1270
	29	1290
	31	1310
	33	1330
	35	1350
E - Extended (1360-1460 nm)	37	1370
	39	1390
	41	1410
	43	1430
	45	1450
S - Short (1460-1530 nm)	47	1470
	49	1490
	51	1510
	53	1530
C - Conventional (1530-1565 nm)	55	1550
L - Long (1565- 1625nm)	57	1570
	59	1590
	61	1610

*Tabulka 2: CWDM kanály podle ITU-T G.694.2*

O (Original) – jedná se o původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm. Vhodné pro přenos informací až do vzdálenosti 60 km. Hodnota měrného útlumu je pro toto pásmo 0,35dB/km.

E (Extended) – použitelné jen u nových druhů vláken splňující standard ITU-T G.652.C.

---

S (Short) – pásmo s kratšími vlnovými délkami. Využívá se hlavně pro nové typy přenosů. Hodně využívané pro CWDM

C (Conventional) – jedno z nepoužívanějších pásem hlavně u WDM. Hodí se pro velké vzdálenosti, protože hodnota měrného útlumu zde dosahuje hodnoty jen 0,2 dB/km.

L (Long) – hodnota měrného útlumu je zde opravdu minimální. Slouží především pro WDM přenosy. Nejčastěji se používá jako rozšíření C-pásma a tím navýšení přenosové kapacity.

## 4.3 DWDM

Husté DWDM vlnové dělení je založené na velmi malých vzdálenostech jednotlivých vlnových délek. Ty mohou být v rozmezí od 0,1 nm (UDWDM – Ultra DWDM) až po 0,8 nm. DWDM pracuje na rozsahu vlnových délek 1490-1620 nm. Pokrývá tedy pásma S, C a L. DWDM momentálně patří mezi nejdokonalejší používané systémy v optoelektronice. Aby bylo možné docílit tak malých rozestupů mezi jednotlivými kanály je potřeba použít co nejpřesnějších optických zdrojů s extrémně úzkou spektrální čarou a precizní kmitočtovou stabilitou. Je tedy potřeba používat aktivně chlazené laserové zdroje a vysoce selektivní filtry. Nejčastěji se jako optické zdroje používají DFB (Distributed Feedback Laser) lasery. Aby nedocházelo ke kolidování jednotlivých kanálů v závislosti na teplotě je nutné používat teplotní stabilizátory. Nutnost absolutní přesnosti všech součástí však výrazně ovlivňuje výrobní cenu. Tato koncepce má však velkou budoucnost, protože její využití s narůstajícími požadavky na přenosové kapacity bude nutné.

U starší DWDM se můžeme setkat s rozestupy jednotlivých vlnových délek 200 GHz. Momentálně se však nejčastěji používá rozestup kanálů 100 GHz. Tolerance u tohoto rozestupu je pro každou vlnovou délku  $\pm 0,16$  nm. Nejvíce u DWDM je využíváno C-pásmo, které je v rozmezí vlnových délek 1530-1565 nm. Pro tohle pásmo totiž existují cenově dostupné komponenty např. EDFA zesilovače. V C pásmu můžeme využít až 40 kanálů při rozestupu vlnových délek 100 GHz.

Samozřejmě se momentálně dá dosáhnout ještě většího dělení, kdy jednotlivé vlnové délky mohou mít rozestupy 50GHz, 25GHz a chystá se i 12,5GHz. Tím nám samozřejmě narůstá násobně počet kanálů, ale také cena všech použitých součástí, která je už tak u této technologie dosti vysoká.

---

## 4.4 Prvky používané u WDM-PON

### 4.4.1 Multiplexery/Demultiplexery

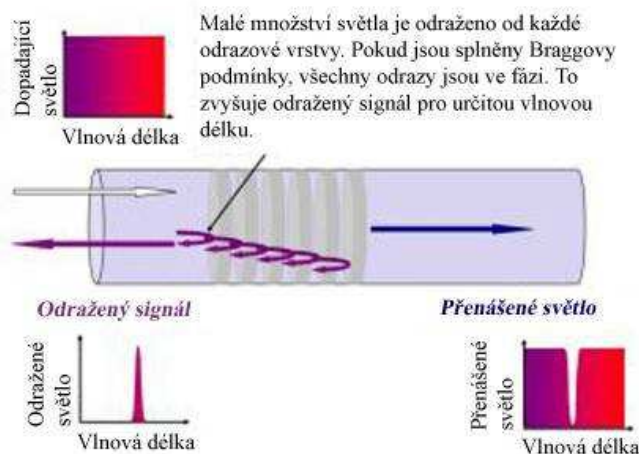
Úkolem multiplexeru je navázání všech příchozích optických signálů do jednoho vlákna. Demultiplexer má zase za úkol rozdělení příchozího vlnového multiplexu na jednotlivé vlnové délky. Multiplexery a demultiplexery obsahují filtry, které toto umožní. Pro tuto činnost se využívají selektivní interferenční filtry, disperzní filtry, ROADM a FBG filtry.

Selektivní interferenční filtry jsou tvořeny tenkými vrstvami dielektrického materiálu se střídavě se měnícím indexem lomu. Filtr v závislosti na vlnové délce dané světelné vlny odrazí nebo propustí dále. Odražená světelná vlna putuje na další filtr a celý proces se opakuje, dokud nejsou rozděleny všechny vlnové délky. Vložený útlum roste úměrně s počtem vlnových délek, které mají být odfiltrovány. Toto řešení je vhodné tedy pro menší počet vlnových délek.

Disperzní filtry pracují na principu rozkladu světla použitím různých hranolů a optických mřížek. Závislost indexu lomu na vlnové délce nám způsobuje, že různé vlnové délky se lámou pod odlišným úhlem. Umístění detektoru je závislé na úhlové disperzi.

ROADM (Reconfigurable optical add-drop multiplexer) funguje v principu jako optická výhybka. Pomocí ní můžeme vybrat z optického signálu jednotlivé vlnové délky. Dokonce lze vybrat i rozmezí vlnových délek, které mají být dále propuštěny.

FBG (Fiber Bragg Grating) je filtr založený na principu Braggovy mřížky. Jedná se o vlákno, které je opatřeno odrazivou mřížkou vypálenou v průběhu výroby pomocí UV laseru. Dříve se tato mřížka vyráběla rytím do vlákna. FBG funguje na principu reflektoru a danou vlnovou délku odrazí zpět. Ostatní vlnové délky jsou propuštěny.



Obrázek 18: Princip Braggovy mřížky[14]



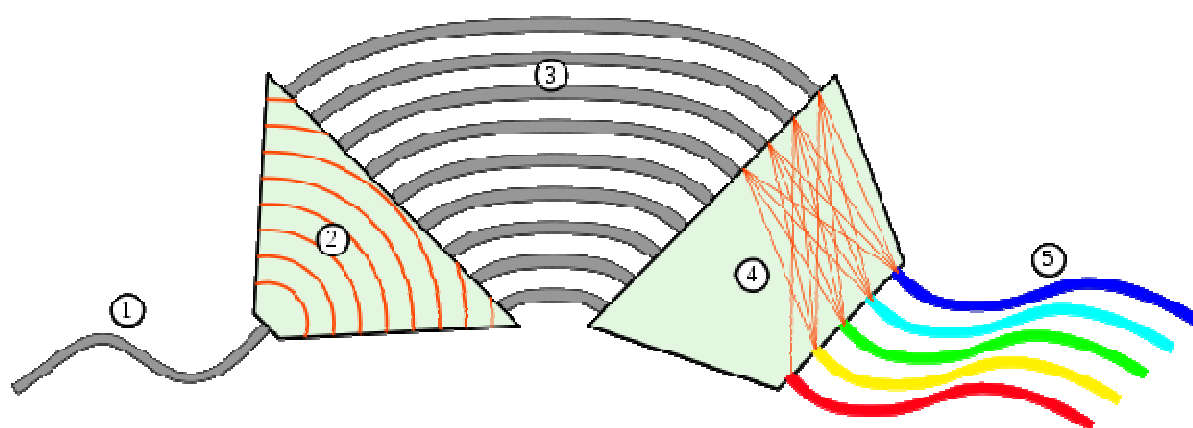
#### 4.4.2 AWG filtr

AWG (Arrayed Waveguide Grating) filtr slouží k rozdělení jednotlivých vlnových délek, přichozícího optického signálu, do polí vlnovodů na výstupu. To znamená, že na výstupech jednotlivých kanálů je jen signál o přesné vlnové délce. V opačném směru zase dochází k sloučení vstupních vlnových délek do jednoho vlnového multiplexu.

Na vstupní vlákno AWG filtru je napojen rozšiřující vlnovod. Zde se nachází oblast FPR (Free Propagation Region), ve které již není paprsek omezen ze stran, ale stává se rozbíhavým. Na tuto oblast navazuje pole vlnovodů, které jsou stáčený do oblouků. Jednotlivé vlnovody však nemají stejnou délku. Tyto vlnovody dále ústí do širokého vlnovodu na výstupu AWG filtru a odtud je dále signál rozdělován podle jednotlivých vlnových délek do výstupních vlnovodů.

AWG filtr funguje na principu změny fázového posuvu jednotlivých vlnových délek procházejících polem vlnovodů různě dlouhých. Na výstupu pole vlnovodů se i malé změny vlnové délky projeví na fázovém posuvu mezi jednotlivými vlnovody a výsledná výstupní ekvifázová plocha se pootočí o úhel úměrný změně vlnové délky a tato plocha je tak směřována do jiného výstupního vlnovodu.

Délka pole vlnovodů je zvolena tak, že se rozdíl délky optické dráhy mezi přilehlými vlnovody rovná celočíselnému násobku střední vlnové délce demultiplexeru.



Obrázek 19: AWG filtr[22]

- 1) Vstupní signál
- 2) Oblast FPR
- 3) Pole vlnovodů rozdílné délky
- 4) Oblast FPR
- 5) Rozdělené výstupní signály dané vlnové délky

---

Výhodou AWG filtru je hlavně jeho velmi nízký útlum, který se s rostoucím počtem výstupů nijak nemění.

#### 4.4.3 Pasivní optické děliče

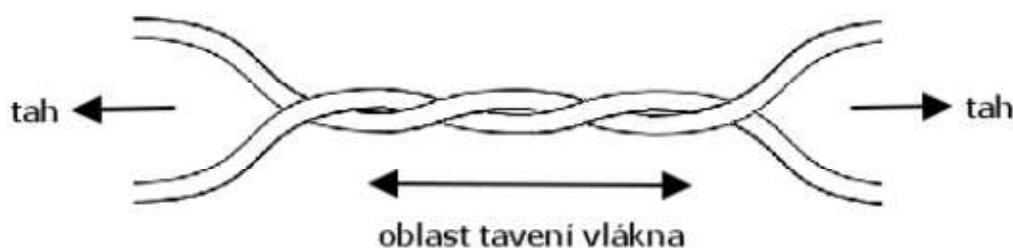
Úkolem pasivního optického děliče je rozdělení vstupního signálu do více vláken. V opačném směru zase složení signálů s více vláken do jednoho. Pasivní optický dělič signály nijak netřídí a neupravuje. Ke své práci nepotřebuje žádné napájení. Jeho použitím nám však v trase vzniká útlum, který roste s velikostí dělicího poměru. Počet pasivních optických rozbočovačů v síti a jejich dělicí poměr nám tedy ovlivňuje i délku trasy, které může pasivní optická síť dosáhnout.

Dělicí poměr	Útlum [dB]
1:2	3,9
1:4	7,4
1:8	10,8
1:16	14,1
1:32	17,3
1:64	18,5

*Tabulka 3: Útlumy děliče*

Pasivní optické děliče můžeme rozdělit do dvou skupin, které se liší technologií výroby. Jedná se o FBT a PLC filtry.

FBT (Fused Biconical Taper) jejich výroba probíhá natavením jednotlivých vláken k sobě. Nejčastěji se používá metoda kroucením, kdy jsou jednotlivá vlákna bez ochranných vrstev zkroucena k sobě, jak je ukázáno na obrázku 20. Toto místo, kde se vlákna dotýkají, je zahříváno a dochází k tavení vláken. Při tomto kroku jsou vlákna natahována, tak aby došlo v oblasti spoje k zúžení, prodloužení a slučování vláken. Během celého procesu dochází k monitorování vláken a v okamžiku dosažení vhodného dělicího poměru je proces tavení zastaven. Tyto pasivní optické děliče lze však vyrábět jen v poměru 1:2 – 1:4. Většího dělicího poměru se dá dosáhnout jejich kaskádním uspořádáním.

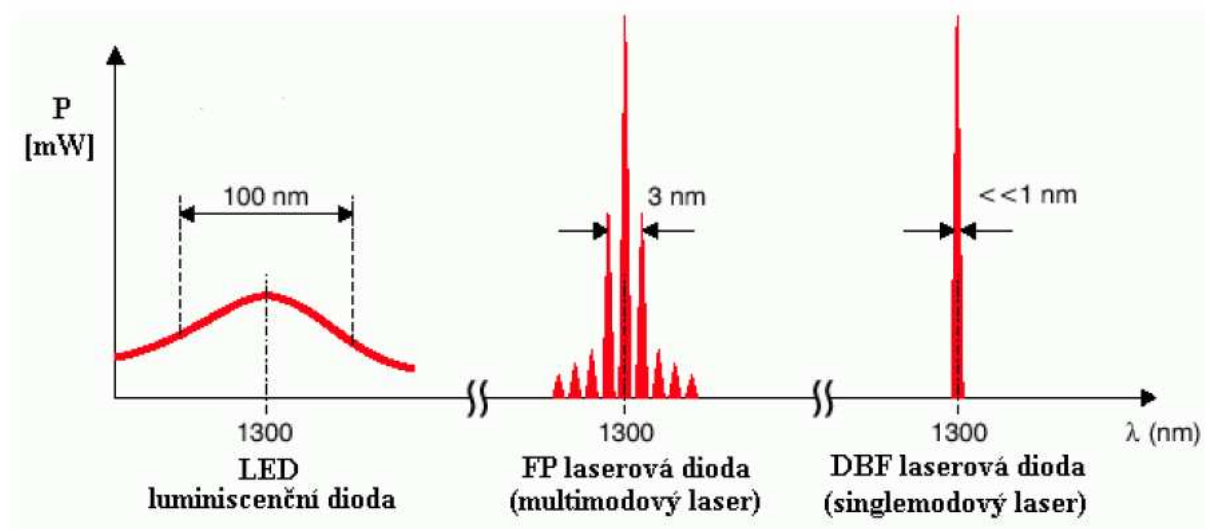


Obrázek 20: FBT dělič[19]

PLC (Planar Lightwave Circuit) jejich výroba je na základě planární technologie. Základem této technologie je nanášení jednotlivých vrstev na křemíkový substrát. Díky tomuto postupu lze dosáhnout pasivních optických děličů s dělicím poměrem až 1:128.

## 4.5 Optické zdroje

Jako optický zdroj se u optických sítí využívají laserové diody. Laserová dioda je, pro použití v telekomunikační přenosové technice, polovodičová dioda na jejímž PN přechodu dochází k přeměně elektrické energie na světlo. Laserové diody se, oproti LED diodám, vyznačují výrazně užší spektrální čarou a vysokým jasnem. Jedná se o koherentní zdroj světla. To znamená, že světlo nemá chaotickou fázi mezi jednotlivými fotony, ale vzájemné fáze jsou přesně definovány.



Obrázek 21: Spektra polovodičových zdrojů záření[15]

---

#### 4.5.1 Fabry-Perot lasery

Fabry-Perot lasery jsou mnohamódové lasery. Jejich rezonátor omezuje vlny na stojaté. Toho je dosaženo pomocí dvou polopropustných zrcadel, které jsou umístěné na protilehlých stranách polovodiče, mezi nimiž je aktivní oblast. Takto vzniklá dutina nám odráží světlo zpět a dále, tím nám vytváří stojaté vlnění. U ostatních vln je skoková změna fáze a proto se nešíří. Rezonátor podporuje podélné módy laseru. Výsledné spektrum Fabry-Perotova laseru má hřebenový tvar. Jednotlivé peaky odpovídají dílčím podélným vidům Fabry-Perotova rezonátoru. Fabry-Perot lasery se používají spíše pro kratší trasy, kde nevadí větší šířka spektrální čáry.

#### 4.5.2 DFB lasery

DFB (Distributed Feed Back) lasery jsou jednomódové lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou. U DFB laserů není rezonátor tvořen pomocí zrcadel, ale využívá se difrakčních mřížek, tedy prostorových periodických struktur. Naleptání difrakční mřížky se provádí těsně u aktivní vrstvy. Difrakční mřížka nám funguje jako optický filtr a do aktivní oblasti se nám odrazí jen velmi úzké spektrum vlnových délek. Díky tomu DFB lasery mají velmi úzkou spektrální šířku, která je menší než 1nm. Jejich modulační šířka pásma je v řádu jednotek až desítek GHz. Tyto lasery se používají především v optických komunikacích a jsou velmi vhodné pro WDM technologie.

#### 4.5.3 Laditelné lasery

Laditelné lasery fungují na principu generování širokého spektra záření. Jednotlivé úzké spektrální čáry můžeme vybírat pomocí změny vnějších parametrů např. laserového rezonátoru. Hlavními parametry u laditelných laserů jsou ladící rozsah, ladící zpoždění a výstupní výkon.

Cena těchto laserů je výrazně vyšší než u klasických laserů s pevně danou spektrální čarou a proto je jejich nasazování spíše omezené. Jejich využití je však vhodné především pro koncové ONT jednotky u WDM-PON sítí. Tam je jejich univerzálnost velkým přínosem, protože se nemusí vyrábět desítky různých koncových ONT jednotek pro každou vlnovou délku. To nám samozřejmě přináší i výhodu při správě a údržbě těchto sítí, kdy nám jako záložní prvek stačí jen jedna univerzální koncová ONT jednotka.

---

## 4.6 Optické přijímače

Pro příjem optického signálu se používají fotodetektory, které jsou důležitou součástí optických přenosových tras. Určují nám celkovou účinnost a výkonnost systému. Úkolem fotodetektoru je přeměna světla na elektrický proud. Mezi důležité parametry u fotodetektorů jsou vysoká citlivost v oblasti pracovních vlnových délek, krátká doba odezvy, teplotní stabilita, malá hodnota vlastního šumu a malá velikost. Pro využití v telekomunikačních optických systémech se používají především lavinové fotodiody APD a fotodiody PIN.

### 4.6.1 Lavinové fotodiody APD

Jedná se o fotodiody s velmi vysokou citlivostí. Stejně jako u ostatních lavinových jevů, i v tomto případě se jedná o „vyražení“ částic, které pak disponují vysokou energií, a každá z nich uvede do pohybu mnoho dalších. Vznik lavinového jevu by nebyl možný bez silného magnetického pole, v kterém částice nabývají na rychlosti. V případě fotodiod APD je to foton, který dopadem do aktivní oblasti a vlivem silného elektrického pole uvolní jeden pár elektron-díra a zahájí tak lavinovou reakci.

Lavinová ionizace způsobí, že citlivost fotodiod APD je vyšší než u ostatních fotodiod. Vyšší je však také šum, způsobený lavinovým efektem. Kromě toho situaci komplikuje nutnost vyššího napájecího napětí, často přesahujícího 100V.

APN diody nejsou tak často používány jako fotodiody PIN. Hlavním důvodem je vysoká cena, která je vyšší díky velmi komplikované výrobě.[13]

### 4.6.2 Fotodiody PIN

U tohoto typu fotodiod se uměle vytváří větší vyprázdněná oblast přidáním oblasti I. Díky velké oblasti prostorového náboje mají tyto diody malou kapacitu a převládá u nich driftový pohyb nosičů náboje.

PIN fotodiody se skládá ze třech oblastí. Oblasti P a N jsou relativně tenké a oblast I je relativně tlustá. Dioda je konstruována tak, aby světlo dopadalo čelně na strukturu diody. Někdy se také využívá odrazu světla od zadní stěny diody a tím se dá zvýšit její citlivost. Oblast pro genezi nosičů je oblast I, kde je soustředěno velké napětí, které je schopno vygenerovaný nosič odvést.

Výhodou je široká absorpční oblast a malá kapacita přechodu. Proto je tato dioda využitelná do vyšších přenosových rychlostí.[13]

---

## 5 Návrh WDM-PON v programovém prostředí Optiwave

Návrh WDM-PON sítě byl uskutečněn v simulačním prostředí programu OptiSystem 10 od kanadské společnosti Optiwave. Tato firma se zabývá vývojem simulačních softwarů pro optoelektroniku. Rozsah jejího zaměření je opravdu veliký a jejich programy dokážou nasimulovat skoro vše, co se optoelektroniky týče. Výhodou je určitě neustále se rozšiřující databáze nově vznikajících součástek a obvodů.

Konkrétně program OptiSystem slouží pro návrh a simulaci optických přístupových sítí na úrovni fyzické vrstvy. V mém případě se jedná o návrh WDM-PON. Není však problém nasimulovat i síť typu APON, BPON, EPON a další.

Návrh mé sítě probíhal s přihlédnutím k reálným hardwarovým možnostem, které jsou umístěny na experimentálním pracovišti Katedry 440, Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě. Pro měření je využíváno celkem 6 kanálů pro sestupný směr a 6 kanálů pro vzestupný směr. Je to z důvodu dostupnosti jen šesti koncových ONT jednotek na experimentálním pracovišti. Konkrétní návrh WDM-PON sítě lze vidět na obrázku 22. Jednotlivé části navržené sítě si popíšeme v následujících podkapitolách.

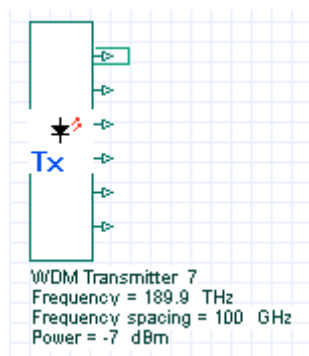


---

## 5.1 Vysílací část – OLT jednotka

Vytvořená OLT jednotka se skládá z WDM Transmitteru, AWG filtru a přijímací části signálu z vzestupného směru.

### 5.1.1 WDM Transmitter



Obrázek 23: Obrázek 24: WDM Transmitter

*WDM Transmitter* jsem zvolil, protože jeho součástí je již optický vysílač, generátor pseudo-náhodných čísel a pulzní generátor NRZ. *WDM Transmitter* má zvoleny tyto parametry:

- 6 vysílacích kanálů
- počáteční kmitočet 189,9 THz
- rozestup kanálů 100 GHz
- vysílací výkon -7 dBm
- přenosová rychlost 100 Mb/s a 1Gb/s

Počáteční kmitočet je 189,9 THz s rozestupy 100 GHz. Přibližně kopíruje jednotlivé kanály, které jsou uvedeny v manuálu přístroje na experimentálním pracovišti. Jednotlivé kanály lze vidět v tabulce 4.



Kanál	Kmitočet [THz]
1	190,4
2	190,3
3	190,2
4	190,1
5	190
6	189,9

Tabulka 4: Kmitočty kanálů pro sestupný směr

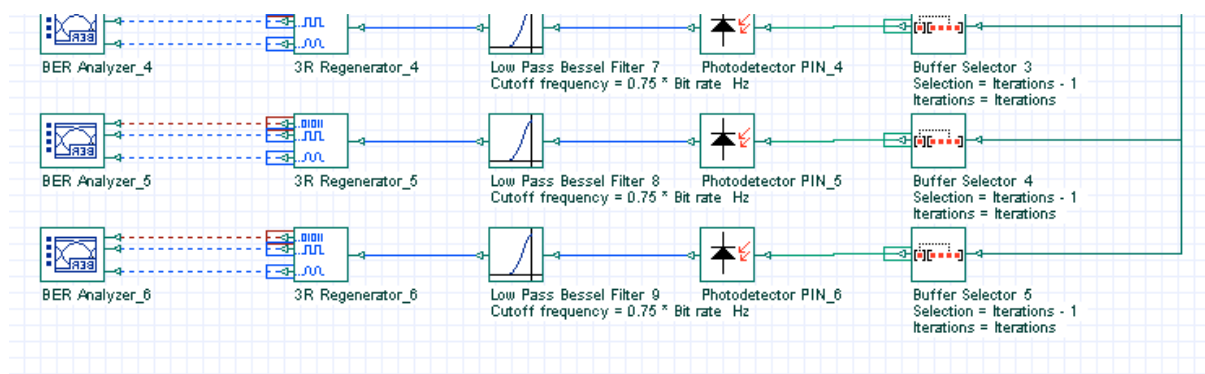
### 5.1.2 AWG filtr

Jako AWG filtr (schéma zobrazeno v příloze A) byl zvolen typ *AWG NxN Bidirectional*. Tento filtr slouží pro obousměrný provoz a je plně nastavitelný. *AWG NxN Bidirectional* má zvoleny tyto parametry:

- 57 kanálů
- počáteční kmitočet 189,9 THz
- rozestup kanálů -100 GHz
- útlum 4 dBm

Velký počet kanálů byl zvolen z důvodů použití dvou odlišných přenosových pásem. Sestupný směr je v rozmezí kmitočtů 189,9-190,4 THz a vzestupný 195,0-195,5 THz. AWG filtr musí tedy filtrovat rozmezí kanálů 189,9-195,5 THz tak, aby oba směry pokryl. Na nevyužité vstupy, pro správnou funkci, je potřeba připojit prvek *Optical Null*.

### 5.1.3 Příjímací část



Obrázek 25: Příjímací část OLT

---

Přijímací část je tvořena buffer selektorem, fotodetektozem, dolní propustí, 3R Regenerátorem a BER analyzátozem. *Buffer Selector* slouží jen pro účely simulace a jeho funkce spočívá ve vybrání iterace, která bude dále propuštěna. Jako fotodetektor byla zvolena fotodioda typu PIN – *Photodetector PIN*. Dolní propust nám zajišťuje *Low Pass Bessel Filter*. Úkolem 3R Regenerátoru je zesílení a obnovení tvaru a časové základny. Koncovým článkem je *BER Analyzer*, který nám změří hodnotu BER, Q-faktoru a zobrazí diagram oka.

## 5.2 Přenosová část – ODN

Přenosová část je tvořena obousměrným optickým vláknem a AWG filtrem. Před obousměrným optickým vláknem byl vložen v obou směrech útlum 1.5 dB simulující optické konektory a spojky.

### 5.2.1 Optické vlákno

Bylo použité obousměrné optické vlákno *Bidirectional Optical Fiber*. Parametry vlákna vycházejí ze standardu G.652.D.

Útlum	0,2 dB/km
Chromatická disperze	16,75 ps/nm/km
Náběh disperze	0,075 ps/nm <sup>2</sup> /km
Teplota	27 °C
Dynamický šum	50*10 <sup>-6</sup> 1/km
Rayleighův rozptyl	3 dB

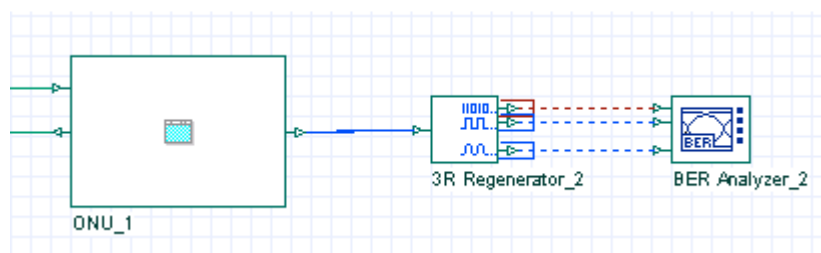
Tabulka 5: Parametry vlákna G.652.D

Délka vlákna byla zvolena 300 metrů. Pro potřeby simulace bylo potřeba vložit před a za vlákno ve vzestupném směru prvky *Optical Delay*. Bez těchto dvou součástí neproběhne simulace v pořádku. U všech použitých měřicích přístrojů za *Optical Delay* je potřeba nastavit hodnotu *Signal Index* na číslo odpovídající počtu použitých *Optical Delay* před tímto přístrojem.

### 5.2.2 AWG filtr

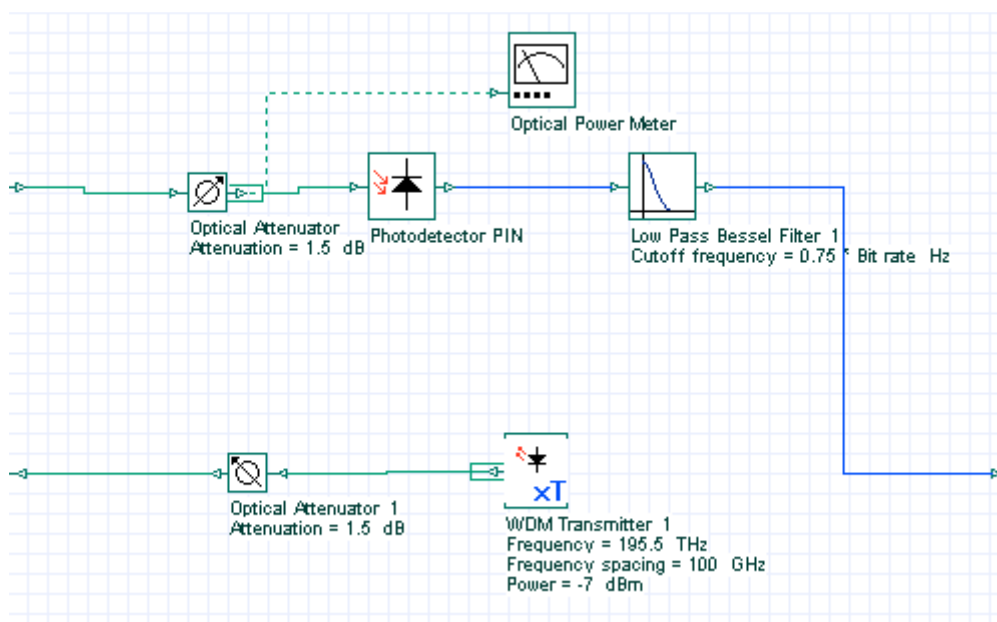
AWG filtr byl použit totožný jako u vysílací části a má stejné parametry. Změna je jen v jeho směru. Nyní slouží pro sestupný směr jako demultiplexer.

## 5.3 Koncová část – ONT jednotky



Obrázek 26: ONT jednotka

Koncovou část tvoří ONT jednotky. Koncová jednotka se skládá z přijímací části, WDM Transmitteru a útlumových článků. První dvě části již byly popsány v předchozích kapitolách. Útlumový článek 1,5 dB nám simuluje optické konektory a spojky.



Obrázek 27: Schéma vytvořené ONT jednotky

---

U přijímací části nebyl použit pouze buffer selektor, který se používá jen v části simulace pro vzestupný směr.

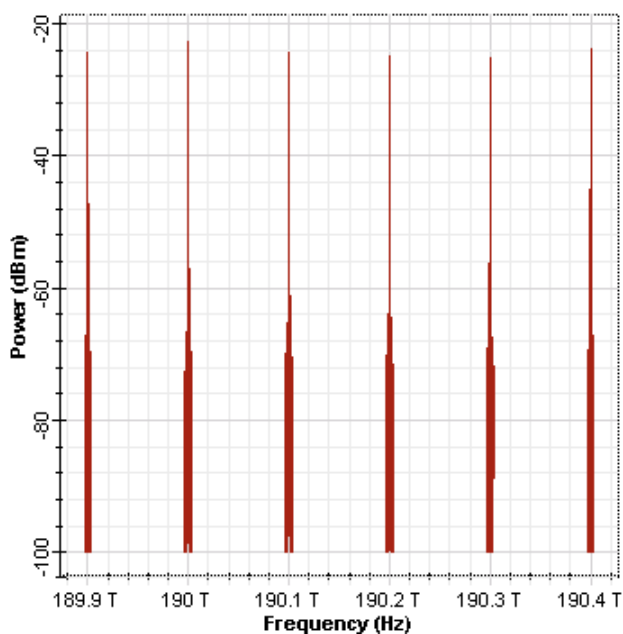
Změna však nastala u nastavených kmitočtů. Jednotlivé optické zdroje byly nastaveny v rozmezí 195,0-195,5 THz. Rozpis kanálů je uveden v tabulce 6.

Kanál	Kmitočet [THz]
1	195,5
2	195,4
3	195,3
4	195,2
5	195,1
6	195

*Tabulka 6: Kmitočty kanálů pro vzestupný směr*

## 5.4 Měření pomocí optického spektrálního a WDM analyzátoru

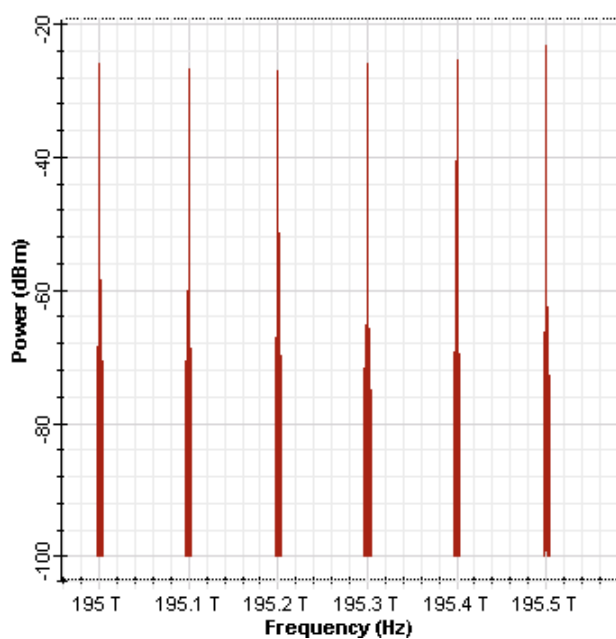
Pomocí spektrálního analyzátoru připojeného za 300 m dlouhé vlákno lze vykreslit vlnový multiplex s jednotlivými kanály. Na obrázku 27 lze vidět kanály pro sestupný směr s rozestupem 100GHz.



*Obrázek 28: Spektrum kanálů pro sestupný směr*

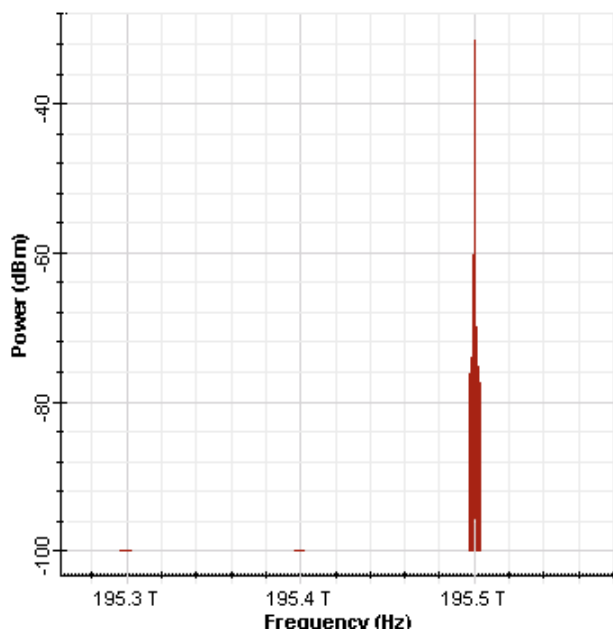
---

Obrázek 28 nám zobrazuje jednotlivé kanály pro vzestupný směr s rozstupem 100GHz.



*Obrázek 29: Spektrum kanálů pro vzestupný směr*

Na obrázku 29 je znázorněn jeden odfiltrovaný kanál vyvedený z AWG filtru do koncové ONT jednotky. Okolní kmitočty nebyly propuštěny a máme tedy jen kanál o daném kmitočtu.



*Obrázek 30: Spektrum kanálu za AWG filtrem*

Aby bylo možné nasimulované hodnoty porovnat s reálnými naměřenými hodnotami, tak bylo zapotřebí změřit hodnoty ve vhodném místě. Pro sestupný směr lze měření výkonové úrovně uskutečnit až na konci trasy. Pro vzestupný směr musí měření proběhnout již před AWG filtrem OLT jednotky, protože v reálných podmínkách již dále měřit nemůžeme. AWG filtr je totiž součástí OLT jednotky. V tabulkách 7 a 8 vidíme naměřené hodnoty výkonové úrovně na jednotlivých kanálech pro sestupný a vzestupný směr.

Kanál	Kmitočet [THz]	Výkon - před AWG [dBm]	Výkon - za AWG [dBm]
1	190,4	-15,28291	-19,28291
2	190,3	-15,16391	-19,16391
3	190,2	-15,16181	-19,16181
4	190,1	-15,28151	-19,28151
5	190	-15,29161	-19,29161
6	189,9	-15,29441	-19,29441

*Tabulka 7: Útlum kanálů v sestupném směru*

Kanál	Kmitočet [THz]	Výkon [dBm]
1	195,5	-15,2797
2	195,4	-15,2796
3	195,3	-15,2795
4	195,2	-15,2796
5	195,1	-15,2796
6	195	-15,2798

*Tabulka 8: Útlum kanálů v vzestupném směru*

---

## 5.5 Měření pomocí BER analyzátoru

Pomocí tohoto nástroje můžeme změřit velké množství parametrů a zobrazit diagram oka.

### 5.5.1 BER

BER (Bit Error Rate) bitová chybovost kanálů nám vyjadřuje kvalitu digitálního přenosu. Udává se jako poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů během sledovaného časového úseku. Můžeme, ho vyjádřit rovnicí jako bezrozměrné číslo:

$$BER = \frac{N_E}{N_A}$$

$N_E$  ... počet chybně přenesených bitů

$N_A$  ... počet všech přenesených bitů

V tabulce 9 jsou naměřené hodnoty BER pro sestupný a vzestupný směr.

	BER	
	100 Mb/s	1 Gb/s
Sestupný směr	0	$6,5045 \cdot 10^{-38}$
Vzestupný směr	0	$5,4765 \cdot 10^{-84}$

Tabulka 9: Hodnoty BER

Pro přenosovou rychlost 100Mb/s byla bitová chybovost nulová a nedocházelo tedy k žádné ztrátě. Reálným podmínkám tato hodnota nebude určitě odpovídat.

### 5.5.2 Q-faktor

Q- faktor je parametr popisující kvalitu oka diagramu. Čím je tato hodnota větší tím je diagram oka kvalitnější. V tabulce 10 jsou naměřené hodnoty Q-faktoru pro sestupný a vzestupný směr. Naměřené hodnoty jsou dosti vysoké a v obou směrech vystačující.

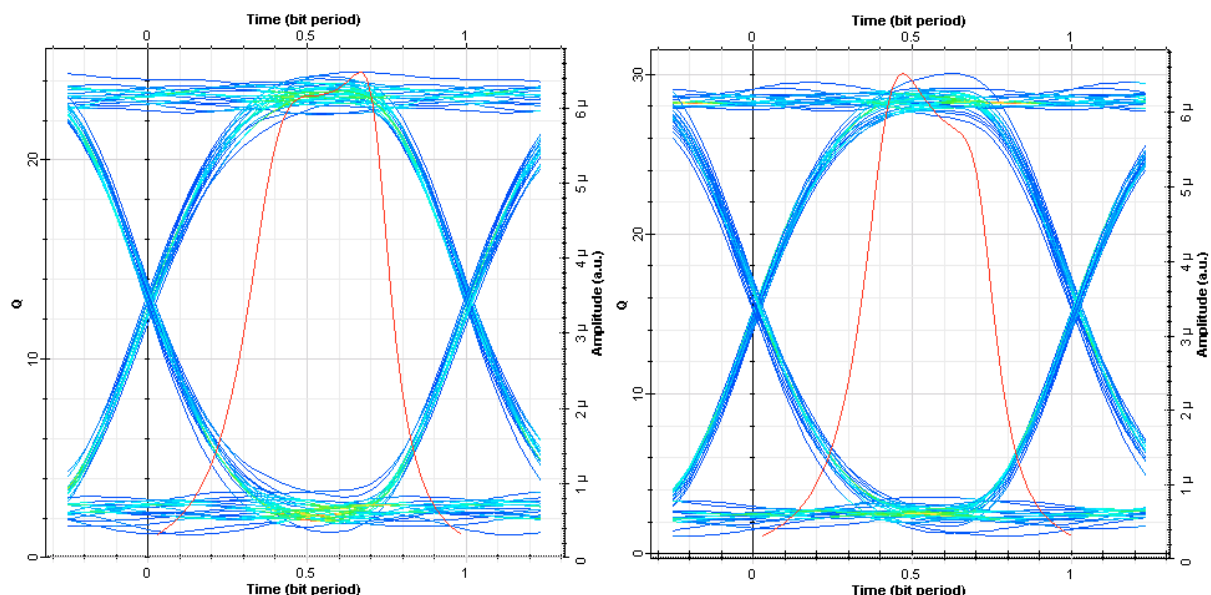
	Q-faktor	
	100 Mb/s	1 Gb/s
Sestupný směr	41,9079	12,8176
Vzestupný směr	52,7008	19,3811

Tabulka 10: Hodnoty Q-faktoru

### 5.5.3 Diagram oka

Diagram oka se používá v telekomunikačních systémech jako jednoduchý nástroj pro analýzu digitálního přenosu. Poskytuje nám pohled na vyhodnocení přenosové charakteristiky systému a můžeme podle něj diagnostikovat kanálové chyby. Vodorovná osa nám zobrazuje čas, ve kterém se mění úroveň logické nuly a logické jedničky. Horizontálním osa nám ukazuje úroveň digitálního signálu. Kvalitu oka nám vyjadřuje Q-faktor.

Diagram oka pro sestupný a vzestupný směr je zobrazen na obrázku 30. Na obou diagramech je otevření oka ideální s minimálním zašuměním. Toto nám potvrzuje i hodnota Q-faktoru. Je to díky použití dolní propusti *Low Pass Bessel Filter*, který slouží k zredukování počtu harmonických.



Obrázek 31: Diagram oka pro přenosovou rychlost 100 Mb/s

Diagram oka pro 1Gb/s je zobrazen v příloze B.



---

## 6 Měření na reálném pracovišti

Měření, jak již bylo uvedeno, probíhalo na experimentálním pracovišti na Katedře 440. Toto pracoviště je dostatečně vybaveno pro možnosti testování technologie EPON a WDM-PON.

Pro testování WDM-PON technologie je zde OLT jednotka LG-Nortel EAST 1100, AWG filtr LG-Nortel WPF 1132c a 6 kusů koncových ONT jednotek LG-Nortel EARU 1112. OLT jednotka a AWG filtr byly zabudovány v racku. Součástí racku jsou patch panely, které obsahují velké množství pasivních optických děličů a simulačních optických tras. V patch panelu jsou také vyvedeny jednotlivé optické spoje k samostatným pracovištím.

### 6.1 WDM-PON zařízení

#### 6.1.1 LG-Nortel EAST 1100



*Obrázek 32: LG-Nortel EAST 1100[23]*

LG-Ericsson EAST 1100 (Ethernet Access Service Terminal) je hlavní stanice určená pro instalaci do hlavních rozvodů. Zařízení je provedeno jako modulární s možností zástavby do Rack stojanu. Modularita zařízení poskytuje snadnou možnost rozšíření kapacity při minimálních nákladech. EAST 1100 je vhodný pro veškeré dnes provozované služby jako jsou např. IPTV, Video on Demand, High speed internet a Voice over IP. Integrované prvky zahrnují až dva L2/L3 switche, diagnostickou kartu dohledového systému a 8x porty pro karty obsluhy koncových zařízení. Datová komunikace ke každému koncovému zařízení dosahuje rychlosti až 1 Gb/s.

---

Zařízení podporuje i testování kvality služby QoS (Quality of Service):

- VLAN podpora (až 4095) - IEEE 802.1q, podpora IEEE 802.3ad
- Linková agregace IEEE 802.3ad (maximum 8 groups)
- Spanning Tree Protocol (STP) IEEE 802.1D
- Klasifikace priorit datového provozu IEEE 802.1p
- Mapování mezi Layer 2 Class of Service (CoS) a Layer 3
- Network scheduling (priorita rozvrhování dle typu přenosu - voice, video, a data traffic)
- Stupňování šíře pásma po 64 Kbps krocích
- Layer 2 až Layer 4 packet classification a filtering
- Port mirroring, Access control lists (ACL)

Součástí zařízení LG-Nortel EAST 1100 byly tři zásuvné moduly:

- diagnostická karta dohledového systému
- karta obsahující 8x port GE/10GE pro zásuvné SFP moduly určený pro obsluhu koncových zařízení
- PON Interface – obsahující multiplexer/demultiplexer pro 32 kanálů s možností rychlostí komunikace až 1 Gb/s. Komunikace pro sestupný směr probíhá v L-pásmu a pro vzestupný v C-pásmu. Seznam všech kanálů pro oba směry je součástí přílohy.

#### 6.1.2 LG-Nortel WPF 1132c

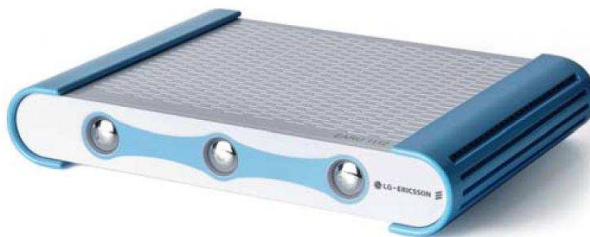


*Obrázek 33: LG-Nortel WPF 1132c[23]*

---

Jedná se o AWG filtr, který slouží jako multiplexer/demultiplexer mezi OLT jednotkou a koncovými ONT jednotkami. Na tento AWG filtr je možné napojit až 32 stanic. Jedná se o pasivní zařízení, které nepotřebuje žádné napájení.

### 6.1.3 LG-Nortel EARU 1112



*Obrázek 34: LG-Nortel EARU 1112[23]*

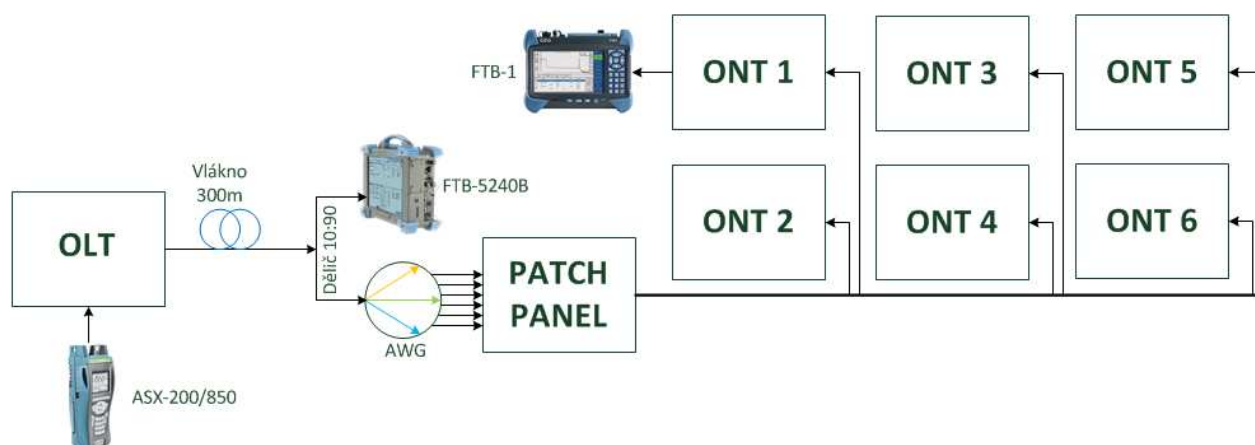
Jedná se o malou koncovou ONT jednotku určenou spíše pro domácnosti. Je vybavena 4x Ethernet portem. Podporuje také testování kvality služby QoS. Její hlavní předností je její univerzálnost díky kompatibilitě v celém spektru vlnových délek. Může být tedy připojena ke kterémukoliv kanálu AWG filtru a okamžitě vysílat na správné vlnové délce. Přenosová rychlost této jednotky je 100Mb/s v obou směrech.

## 6.2 Měřicí přístroje

Pro měření byly využity přístroje od společnosti EXFO. Konkrétně EXFO AXS-200/850, který byl využíván jako Loopback jednotka. Pro měření BER byl použit přístroj EXFO FTB-1. Největší část měření probíhala pomocí optického spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240B, který byl zapůjčen od společnosti Profiber s.r.o.

---

### 6.3 Schéma a parametry měřené sítě



Obrázek 35: Schéma reálného zapojení

Použité zařízení a prvky:

- OLT jednotka LG-Nortel EAST 1100
- AWG filtr LG-Nortel WPF 1132c
- ONT jednotka LG-Nortel EARU 1112
- pasivní optický dělič 10:90
- 300 m optické vlákno standard G.652.D
- krátká optická vlákna G.652.D a spojky pro připojení ONT jednotek

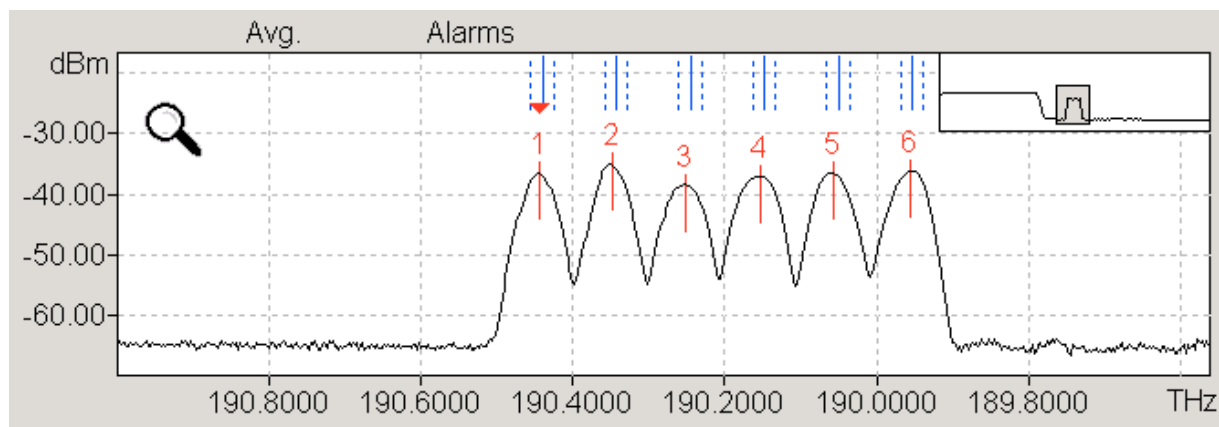
### 6.4 Měření optickým spektrálním analyzátozem

Měření probíhalo pomocí spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240B. Pro měření pomocí spektrálního analyzátoru bylo potřeba použít pasivní optický dělič. V našem případě se jednalo o dělič s poměrem 10:90. Znamená to, že 90% signálu pokračovalo dále do sítě a 10% bylo vyvedeno do spektrálního analyzátoru. Tím jsme si zajistili bezproblémový běh sítě a možnost měření během provozu. Naměřený pokles výkonu u 10% části byl -11,13 dBm. Tento pokles bude potřeba následně zohlednit při srovnání s výsledky simulace.

Tabulka 11 obsahuje naměřené výkony v jednotlivých kanálech pro sestupný směr. Na obrázku 35 je zobrazeno spektrum jednotlivých kanálů v L-pásmu.

Channel	F [THz]	P auto [dBm]	SNR [dB]	Est. Noise [dBm]	Pp [dBm]	Pi [dBm]	Channel Pi [dBm]
1	190,4434	-27,83	26,48	-58,53	-36,63	-27,83	-32,76
2	190,3481	-26,54	24,3	-55,06	-35,12	-26,54	-31,64
3	190,2509	-28,95	21,45	-54,6	-38,51	-28,95	-34,61
4	190,1538	-27,23	23,45	-54,89	-37,08	-27,23	-33,16
5	190,0568	-27,37	23,06	-54,61	-36,51	-27,37	-33,00
6	189,9548	-26,87	29,77	-60,82	-36,19	-26,87	-32,20

Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro sestupný směr ze spektrálního analyzátoru před AWG filtrem

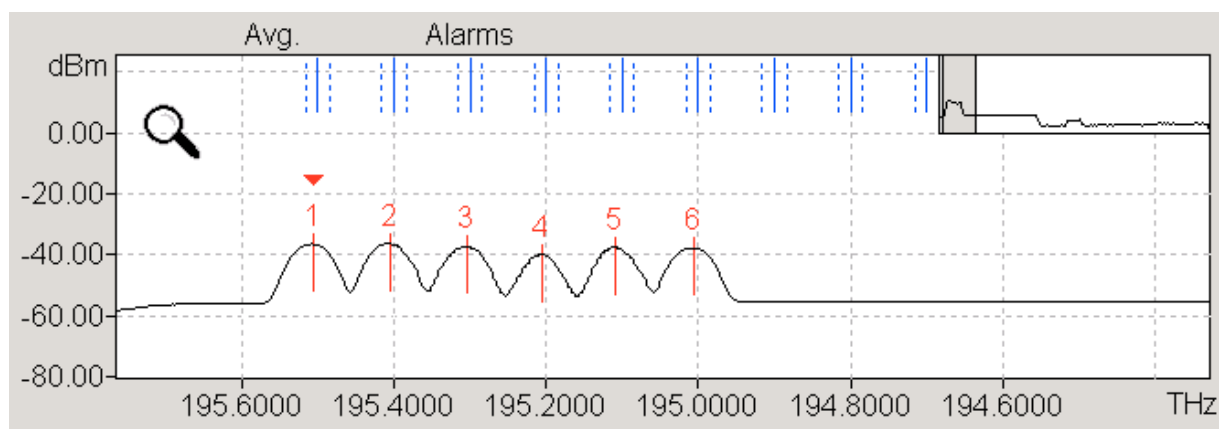


Obrázek 36: Spektrum kanálů pro sestupný směr

Pro vzestupný směr probíhalo měření obdobně jako pro sestupný směr. Došlo jen k otočení a přemístění děliče před OLT jednotku. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 12. Na obrázku 36 můžete vidět spektrum jednotlivých kanálů v C-pásmu.

Channel	F [THz]	P auto [dBm]	SNR [dB]	Est. Noise [dBm]	Pp [dBm]	Pi [dBm]	Channel Pi [dBm]
1	195,5063	-26,53	21,46	-52,66	-36,59	-26,53	-32,18
2	195,4056	-26,67	20,91	-52,25	-36,51	-26,67	-32,04
3	195,3048	-27,81	20,24	-52,71	-37,65	-27,81	-33,15
4	195,2058	-31,06	17,82	-53,53	-40,11	-31,06	-33,85
5	195,1081	-28,26	20,03	-52,94	-37,75	-28,26	-33,85
6	195,0060	-27,84	20,49	-52,97	-37,93	-27,84	-33,54

Tabulka 12: Naměřené hodnoty pro vzestupný směr ze spektrálního analyzátoru za AWG filtrem



Obrázek 37: Spektrum kanálů pro vzestupný směr

## 6.5 Měření BER

Měření probíhalo pomocí přístroje EXFO AXS-200/850, který byl používán jako Loopback jednotka. Jako měřicí přístroj bylo použito zařízení EXFO FTB-1. Při měření BER byl již dělič s poměrem 10:90 z přenosové trasy odpojen.

Pro sestupný směr byla Loopback jednotka zapojena do OLT jednotky pomocí SFP modulu. Měřicí přístroj byl zapojen přes ethernet port v ONT jednotce. Po nezbytném nastavení a spárování mohlo dojít k samotnému měření. U vzestupného směru probíhalo měření obdobně jako pro sestupný směr. Jedinou změnou byla výměna přístrojů. Loopback jednotka byla přes ethernet konektor zapojena do ONT jednotky a měřicí přístroj FTB-1 do OLT jednotky pomocí SFP modulu.

Měření probíhalo postupně na všech šesti kanálech v každém směru. Naměřené hodnoty se v rámci jednoho směru lišily jen minimálně. Tabulka 13 uvádí hodnotu BER pro sestupný a vzestupný směr.

	BER
Sestupný směr	$3,5794 \cdot 10^{-7}$
Vzestupný směr	$2,2609 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 13: Hodnoty BER

---

## 6.6 Porovnání simulovaných a naměřených výsledků

### 6.6.1 BER

V reálných podmínkách proběhla simulace jen pro přenosovou rychlost 100 Mb/s. Vyšší přenosová rychlost nebyla možná, protože ji koncová ONT jednotka nepodporovala. Jedná se totiž spíše o koncovou jednotku určenou pro domácnosti, kde je přenosová rychlost dostačující.

V simulačním prostředí byla naměřena nulová bitová chybovost. V reálných hodnotách byla  $3,5794 \cdot 10^{-7}$ . Tyto hodnoty nám samozřejmě neodpovídají. Nevýhodou simulačního prostředí je značné zidealizování celého zapojení. Nepůsobí zde žádné vnější vlivy a parazitní jevy.

### 6.6.2 Měření spektrálním analyzátozem

Při reálném měření pro připojení spektrálního analyzátoru bylo nutné použít dělič. V mém případě byl použit dělič s poměrem 10:90. Pro porovnání naměřených výsledků je potřeba tuto skutečnost zohlednit. Naměřený pokles výkonové úrovně byl tedy upraven přičtením hodnoty 11,13 dBm, která odpovídá útlumu signálu při průchodu děličem. Výsledné hodnoty a jejich porovnání jsou uvedené v tabulkách 14 a 15.

Kanál	Kmitočet [THz]	Simulace		Reálné měření	
		Výkon - před AWG [dBm]	Výkon - za AWG [dBm]	Výkon - před AWG [dBm]	Výkon - za AWG [dBm]
1	190,4	-15,28291	-19,28291	-16,7	-20,75
2	190,3	-15,16391	-19,16391	-15,41	-19,62
3	190,2	-15,16181	-19,16181	-17,82	-22,14
4	190,1	-15,28151	-19,28151	-16,1	-20,19
5	190	-15,29161	-19,29161	-16,24	-20,41
6	189,9	-15,29441	-19,29441	-15,74	-19,99

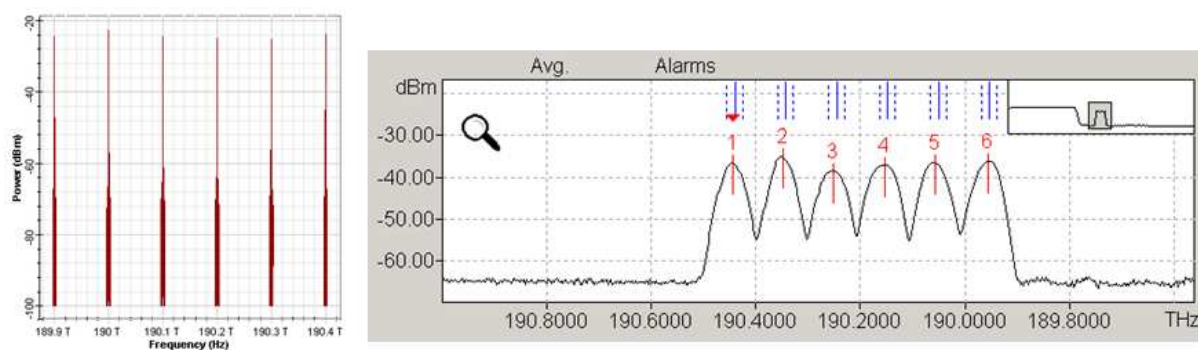
Tabulka 14: Porovnání výkonů pro sestupný směr

Kanál	Kmitočet [THz]	Simulace	Reálné měření
		Výkon [dBm]	Výkon [dBm]
1	195,5	-15,2797	-15,40
2	195,4	-15,2796	-15,54
3	195,3	-15,2795	-16,68
4	195,2	-15,2796	-19,93
5	195,1	-15,2796	-17,13
6	195	-15,2798	-16,71

Tabulka 15: Porovnání výkonů pro vzestupný směr

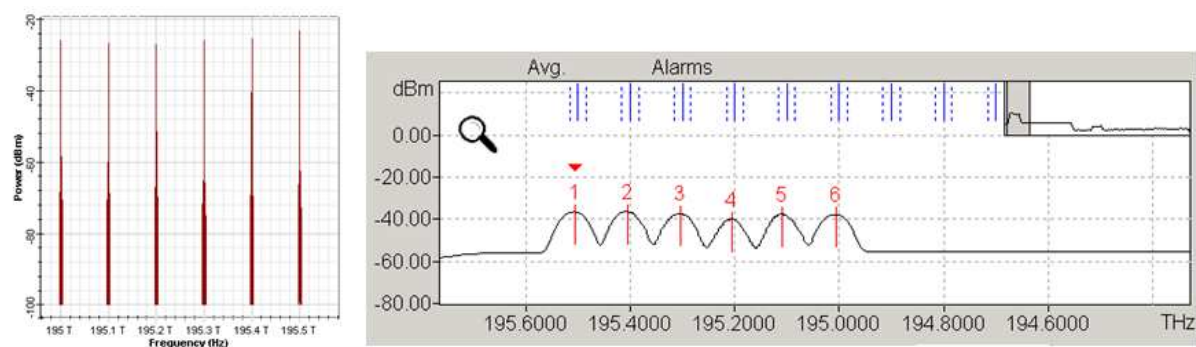
Naměřené hodnoty přibližně navzájem odpovídají. Vzhledem k tomu, že bylo použito reálných výstupních výkonů OLT a ONT jednotek a byly zohledněny útlumy konektorů, tak byl výsledek podle očekávání. U reálně naměřených hodnot si můžeme všimnout jistého kolísání výkonu, které v simulaci není. Je to způsobeno druhem použité diody. Jednotky na experimentálním pracovišti používaly Fabry-Perotovi laditelné lasery. Ten se sice pokaždé naladí na správný kmitočet, ale s jinou hodnotou výkonu.

Na obrázcích 37 a 38 můžeme vidět porovnání vykreslených kanálů ze spektrálního analyzátoru.



Obrázek 38: Srovnání zobrazení spektrálním analyzátořem pro sestupný směr





Obrázek 39: Srovnání zobrazení spektrálním analyzátořem pro vzestupný směr

Z obrázků je patrné, že simulované hodnoty mají užší spektrální čáru. Je to z důvodů použitých rozdílných optických zdrojů. V simulaci byly použity DFB lasery, které mají obecně užší spektrální čáru oproti Fabry-Perotovým laserům. Vykreslené kmitočty kanálů však sobě vzájemně odpovídají a lze tedy potvrdit správnou funkčnost AWG filtru v simulačním prostředí.

---

## 7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byl návrh pasivní optické přístupové sítě s vlnově děleným multiplexem WDM-PON. V simulačním prostředí programu OptiSystem 10 od společnosti Optiwave byla navržena síť založená na technologii WDM-PON s přihlédnutím na reálně možnosti experimentálního pracoviště Katedry 440, Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě.

První část práce je zaměřena na teoretický úvod do problematiky pasivních optických sítí. Jsou zde popsány jednotlivé možnosti topologií a používané technologie. Podrobněji jsou popsány technologie založené na časovém multiplexu TDM a to standardy APON, BPON, GPON, EPON, 10GEPON a XG-PON. Významná část teoretického úvodu je soustředěna pasivním optickým sítím s vlnově děleným multiplexem WDM-PON. Je zde vysvětlena funkce této technologie, možné návrhy zapojení a jejich klady a zápory. Část kapitoly je také věnována používaným zařízením a součástkám, které ji tvoří.

V druhé části práce byla navržena WDM-PON síť v simulačním prostředí OptiSystem 10. Zapojení bylo navrženo pro 6 koncových jednotek z důvodů hardwarových možností na experimentálním pracovišti. To sice umožňuje zapojení až 32 koncových jednotek, ale dostupných jich bylo pouze 6 kusů. Počáteční kroky byly celkem těžké a nastavení programu dosti složité. Program neobsahuje reálné zařízení, ale je potřeba je složit z jednotlivých prvků. Po vytvoření vhodného návrhu sítě bylo nutné vyřešit problémy s funkčností simulace. Pro správný běh simulace je totiž zapotřebí použití pár speciálních prvků, které se v běžném zapojení nevyskytují. Hlavní problémy se týkaly hlavně vzestupného směru při použití stejného vlákna jako pro sestupný směr, kde muselo být přidáno několik prvků Optical Delay. Teprve po odstranění všech problémů mohlo dojít k samotnému měření a nastavování konkrétních parametrů. V průběhu návrhu zapojení již začalo i samotné měření na experimentálním pracovišti. Zde bylo potřeba překonat prvotní problémy s navázáním spojení s OLT jednotkou. Po základním nastavení přes sériový port přišla na řadu komunikace přes síťovou kartu pomocí dodaného softwaru. Zde nastal největší problém, protože zařízení nekomunikovalo se síťovou kartou počítače. Tento problém se bohužel nepodařilo vyřešit a bylo nutno otestovat několik počítačů. Nakonec se nám díky jednomu počítači podařilo navázat komunikaci. Po prvotním nastudování manuálu a zorientování se, se nám podařilo aktivovat všechny jednotky a mohlo dojít k samotnému měření.

Nyní bylo možné přejít k srovnání naměřených hodnot ze simulátoru a reálného měření. Zde se potvrdily předpoklady ohledně značného idealizování simulace. Naměřené hodnoty neodpovídaly úplně naměřeným hodnotám. Většina nasimulovaných hodnot vykazovala lepší výsledky. Nebyly zde totiž zohledněny vnější vlivy a parazitní jevy.

---

Simulační prostředí je jistě dobrou pomůckou pro návrh sítí. Jeho použití je však potřeba brát s rezervou a jen jako orientační. Při návrhu by měly být zohledněny hlavně praktické zkušenosti a naměřené hodnoty v reálném prostředí.

Sítě založené na vlnově děleném multiplexu mají velkou budoucnost. Tato technologie je již využívána při výstavbě sítí, ale prozatím v omezené podobě. Prozatím nejsou využívány všechny možnosti této technologie. Největším problémem u této technologie je současná cena, která je vyšší než při využití stávajících technologií. S rozvojem této technologie se však přepokládá, že bude výrobní cena postupně klesat. S rostoucími nároky na přenosovou kapacitu však bude tento krok nezbytný.

---

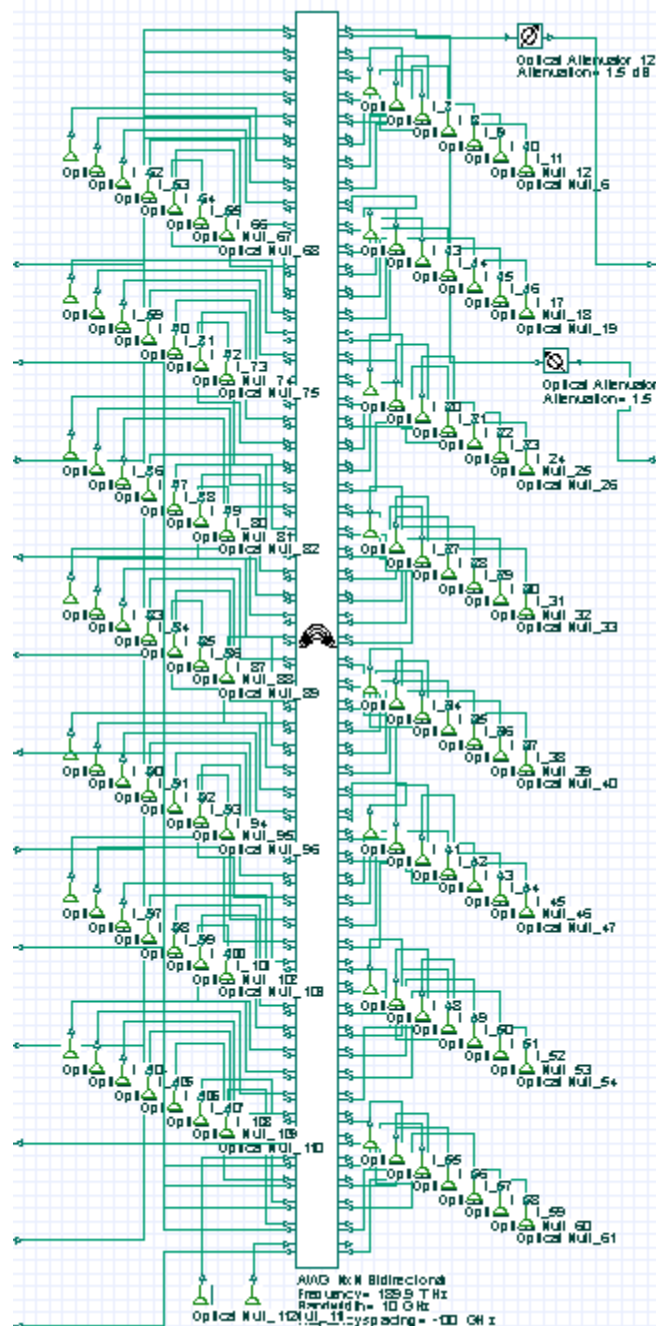
## Použitá literatura

- [1] ITU-TG.984.1. *ITU-T: Gigabit capable passive optical networks GPON General characteristics*. 2008. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/>
- [2] IEEE802.3ah. *IEEE: IEEE Standard 802.3ah-2004, Ethernet in the First Mile*. 2004. vyd. Dostupné z: <http://ieee802.org/3/efm/>
- [3] ITU-TG.984.1. *Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. 2008. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-RECG.984.1-200803-I/>
- [4] ITU-TG.983.4. *A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment*. 2002. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.4-200111-I/>
- [5] ITU-TG.983.1. *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks*. 2005. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1-200501-I/>
- [6] ITU-TG.984.4. *Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): ONT management and control interface specification*. 2008. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.4-200802-P/>
- [7] IEEE802.3av. *Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks*. 2009. vyd. Dostupné z: <http://www.ieee802.org/3/av/>
- [8] LAUDE , JEAN-PIERRE. *DWDM Fundamentals, Components and Applications*. 2002. vyd. Norwood: ARTECH HOUSE, INC. ISBN 1-58053-177-6.
- [9] ITU-TG.987. *10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations, and acronyms*. 2010. vyd. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987-201010-P/>
- [10] KRAUSS, Otmar. *DWDM and Optical Networks: An Introduction to terabit Technology*. 2002. vyd. Erlangen: Publicis KommunikationsAgentur, GWA. ISBN 3-89578-174-6.
- [11] LAFATA, P. a J. VODRÁŽKA. *Pasivní optická síť GPON*. [online]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050002>
- [12] SÝKORA, J. *Princip WDM*. [online]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>
- [13] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. 2006. vyd. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [14] *Princip měření FBG snímačem* [online]. Dostupné z: <http://www.kompozity.info/index.php?pr=44&uid=>

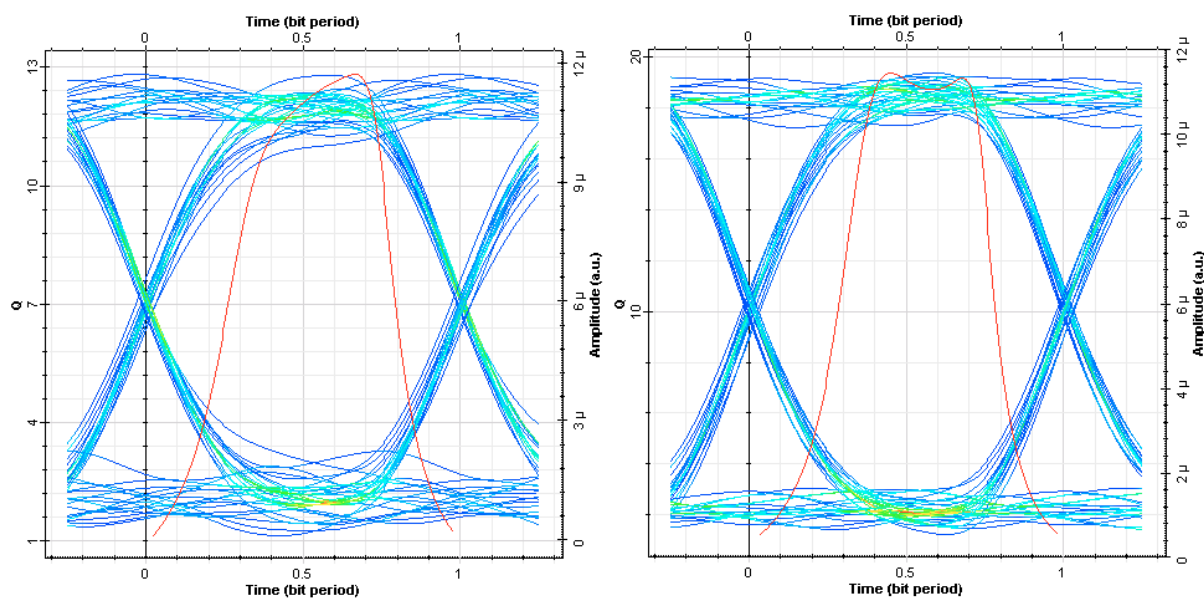
- 
- [15] GOTTWALD, J. *Laserové diody* [online]. 2005. vyd. Dostupné z:  
[http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/ths/Parametry\\_diod.pdf?PHPSESSID=ujvmospofx](http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/ths/Parametry_diod.pdf?PHPSESSID=ujvmospofx)
- [16] AMERSFOORT, M. *Arrayed Waveguide Grating* . [online]. 1998. vyd. Dostupné z:  
<http://www.c2v.nl/products/software/support/files/A1998003B.pdf>
- [17] ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích*. Brno, 2011.
- [18] BROUČEK, J. *Vlnové multiplexy CWDM/DWDM* [online]. 2010. vyd. Dostupné z:  
<http://profiber.cz>
- [19] SNÁŠEL, J. *Vliv teploty na útlum pasivních optických děličů*. 2011. vyd.
- [20] LAFATA, Pavel. *Pasivní optické sítě WDM-PON*. [online]. ISSN ISSN 1214-9675. Dostupné z:  
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>
- [21] POBOŘIL, R. *Simulace flexibilní optické přístupové sítě*. Ostrava, 2011.
- [22] *Arrayed waveguide grating*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-27]. Dostupné z:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed\\_waveguide\\_grating](http://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed_waveguide_grating)
- [23] *Profiber s.r.o.* [online]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu>
- [24] *Optiwave Systems Inc.* [online]. Dostupné z: <http://www.optiwave.com>
- [25] MUKHERJEE, Biswanath. *Optical WDM networks*. New York. 2006. ISBN 978-038-7290-553.

# Přílohy

## Příloha A: AWG filtr použitý v simulaci



*Příloha B: Diagram oka pro přenosovou rychlost 1Gb/s*



*Příloha C: Seznám kmitočtů používaného u WDM-PON LG-Nortel EAST 1100*

L-pásmo (sestupný směr)				C-pásmo (vzestupný směr)			
Kanál	Kmitočet [THz]	Kanál	Kmitočet [THz]	Kanál	Kmitočet [THz]	Kanál	Kmitočet [THz]
1	190.4396	17	188.8820	1	195.50	17	193.90
2	190.3423	18	188.7846	2	195.40	18	193.80
3	190.2449	19	188.6873	3	195.30	19	193.70
4	190.1476	20	188.5899	4	195.20	20	193.60
5	190.0502	21	188.4926	5	195.10	21	193.50
6	189.9582	22	188.3952	6	195.00	22	193.40
7	189.8555	23	188.2979	7	194.90	23	193.30
8	189.7581	24	188.2005	8	194.80	24	193.20
9	189.6608	25	188.1032	9	194.70	25	193.10
10	189.5634	26	188.0058	10	194.60	26	193.00
11	189.4661	27	187.9084	11	194.50	27	192.90
12	189.3687	28	187.8111	12	194.40	28	192.80
13	189.2714	29	187.7137	13	194.30	29	192.70
14	189.1740	30	187.6164	14	194.20	30	192.60
15	189.0767	31	187.5190	15	194.10	31	192.50
16	188.9793	32	187.4217	16	194.00	32	192.40

*Příloha D: CD nosič s navrženou WDM-PON sítí pro simulační prostředí OptiSystem*

---

## Seznam příloh

Příloha A: AWG filtr použitý v simulaci .....	iii
Příloha B: Diagram oka pro přenosovou rychlost 1Gb/s.....	iv
Příloha C: Seznám kmitočtů používaného u WDM-PON LG-Nortel EAST 1100 .....	iv
Příloha D: CD nosič s navrženou WDM-PON sítí pro simulační prostředí OptiSystem .....	iv